การศึกษาความต้านทานเชิงซ้อนในเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ประกอบด้วย UNCD/a:C-H และ Si

STUDY OF IMPEDANCE IN HETEROJUNCTIONS CONSISTED OF UNCD/a:C-H AND Si

จิรวัฒน์ กองกิจ

ชัยวัฒน์ แก้วส่องใส

ณัฐพล สุขเจริญ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

STUDY OF IMPEDANCE IN HETEROJUNCTIONS CONSISTED OF UNCD/a:C-H AND Si

JIRAWAT KONGKIJ

CHAIWAT KAEWSONGSAI

NUTTAPOL SOOKCHAROEN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR

THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)

DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2017

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาความต้านทานเชิงซ้อนในเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ประกอบด้วย UNCD/a:C-H และ Si Study of Impedance in Heterojunctions Consisted of UNCD/a: C-H and Si	
ชื่อนักศึกษา	นายจิรวัฒน์ กองกิจ	รหัสนักศึกษา 57050939
	นายชัยวัฒน์ แก้วส่องใส	รหัสนักศึกษา 57050950
	นายณัฐพล สุขเจริญ	รหัสนักศึกษา 57050965
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส	

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.เชรษฐา รัตนพันธ์ กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การศึกษาความต้านทานเชิงซ้อนในเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ประกอบด้วย UNCD/a:C-H และ Si

ชื่อนักศึกษา นายจิรวัฒน์ กองกิจ รหัสนักศึกษา 57050939
นายชัยวัฒน์ แก้วส่องใส รหัสนักศึกษา 57050950
นายณัฐพล สุขเจริญ รหัสนักศึกษา 57050965

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

คณะ วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

บทคัดย่อ

UNCD ที่เจือด้วย B 0.1%, 5%, และ 20% / Si และ UNCD ที่เจือด้วย N 3% / Si เฮทเทอร์โรจังค์ชันถูกเตรียมโดยวิธีพัลส์เลเซอร์ ความต้านทานเชิงซ้อนที่เป็นฟังก์ชันกับความถี่ได้ถูกวัดที่ความต่างศักย์แตกต่างกันในที่มืดและที่สว่าง จากผลที่ได้พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Z และ f มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมหนึ่งวงที่มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน Z' และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่มค่า V จากผลที่ได้จะสอดคล้องกับวงจรสมมูลที่ประกอบด้วยความต้านทานอนุกรมที่ต่อกับความต้านทานที่ต่อขนาน อยู่กับค่าความจุไฟฟ้าคงตัว โดยที่ 3 V UNCD ที่เจือด้วย B 0.1% / Si เฮทเทอร์โรจังค์ชันมีค่า R_S = 709 Ω, CPE = 1.84 x 10^{-10} F และ R_P = 5.96 x 10^5 Ω ซึ่งมีค่าน้อยกว่า UNCD ที่เจือด้วย B 5% / Si และ UNCD ที่เจือด้วย B 20% / Si โดยผลที่ได้หาจากโปรแกรม EC-LAB และ UNCD ที่เจือด้วย N 3% / Si เฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ 0 V ในที่มืดมีค่า R_S = 2874 Ω, CPE = 3.93 x 10^{-11} F, R_P= 5.14 x 10^3 Ω ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ UNCD ที่เจือด้วย N 3% / Si เฮทเทอร์โรจังค์ชันในที่สว่าง โดยผลที่ได้หาจากโปรแกรม EC-LAB

คำสำคัญ : ความต้านทานเชิงซ้อน ฟิล์มผลึกอัลตร้านาโนไดมอนด์ โฟโตไดโอด เฮทเทอร์โรจังค์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study of Impedance in Heterojunctions Consisted of UNCD/a: C-H and Si
Student	Mr. Jirawat Kongkij Student ID 57050939
	Mr. Chaiwat Kaewsongsai Student ID 57050950
	Mr. Nuttapol Sookcharoen Student ID 57050965
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2017
Advisor	Asst.Prof.Dr. Nathaporn Promros

Abstract

The heterojunctions of UNCD with B doped of 0.1, 5, and 20 at.20% / Si and UNCD with N doped of 3 at.3% / Si were prepared via pulsed laser deposition. The frequency dependence of impedance was measured at the different voltage (*V*), in dark and illumination. From the experimental result, we observed that the relative curves between the imaginary part and real part (*Z'*) were in the shape of semicircle, which the center of the semicircle lied underneath the *Z'* axis, and the size of the diameter decreased when the *V* was increased. From the acquired result, it conforms to the equivalent circuit of the series resistance (R_S) mounted with the connection of parallel resistance (R_P) and constant phase element capacitor (*CPE*). Utilizing EC-LAB, R_S, R_P, and *CPE* values of the 0.1 at.1% B doped UNCD/Si heterojunction were 709 Ω, 5.96×10^5 Ω and 1.84×10^{-10} F, resperctively, which were less than of 5 and 20 at.% B doped UNCD/Si heterojunction, at 3 V. In the dark, the values of R_S, R_P, and *CPE* of the 3 at.% N doped UNCD/Si heterojunction were 2871 Ω, 5.14×10^3 Ω, and 3.93×10^{-11} F, respectively. The obtained R_S, R_P, and *CPE* values in the dark were close to the values of R_S, R_P, and *CPE* in the illumination, which were both computed by EC-LAB at 0 V.

Keywords : Heterojunctions, Impedance, Photodiodes, Ultrananocrystalline Diamond.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ที่อบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี ซื่อสัตย์สุจริต มีความรับผิดชอบ ตั้งใจทำงาน อ่อนน้อมถ่อมตน รับฟังความคิดเห็นคนอื่นเชื่อฟังคำสั่งสอนของครูอาจารย์และพ่อแม่ เป็นคนมีน้ำใจช่วยเหลือผู้อื่น เห็นแก่ประโยชน์ส่วนร่วม มีน้ำใจนักกีฬา กตัญญูรู้คุณพ่อแม่ครูอาจารย์ ที่มอบหมายหัวข้อโครงงานพิเศษเรื่องนี้แก่ผู้วิจัย ทั้งยังสนับสนุนในเรื่องต่างๆ ทั้งในเรื่องอุปกรณ์และสถานที่ปฏิบัติงาน รวมไปถึงคำแนะนำและความรู้ใหม่ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งคำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขส่วนต่างๆ ภายในระบบการทำโครงงานพิเศษเรื่องนี้ให้สำเร็จลุล่วงผ่านไปด้วยดี

ขอขอบคุณ Prof.Dr.Tsuyoshi Yoshitake ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่มหาวิทยาลัยคิวชูและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ให้ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการเพื่อที่จะนำมาใช้ในโครงงานพิเศษนี้อันมีส่วนส่งผลทำให้โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ดร.เชรษฐา รัตนพันธ์ อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สละเวลาอันมีค่าของพวกท่านและให้เกียรติอย่างมากในการเป็นคณะกรรมการสอบวิชาโครงงานพิเศษนี้แก่ผู้วิจัย รวมถึงให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาและเล่มโครงงานพิเศษนี้

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ต่างๆ ด้านฟิสิกส์ให้แก่ผู้วิจัยเพื่อนำมาใช้ในโครงงานพิเศษในครั้งนี้และนำไปใช้ประกอบวิชาชีพ

ขอขอบคุณ นายอดิศร นพรุจิกุล นักศึกษาปริญญาเอก นายวีรศรุต แก่นไร่ นางสาววิวรรณ เฉลียวพงษ์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คอยให้คำปรึกษาตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนนักศึกษาปริญญาตรีทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาตลอดการวิจัยในครั้งนี้อันมีผลให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวของข้าพเจ้าตลอดจนเพื่อนสนิทของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นกำลังใจ แรงผลักดัน ให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยโครงงานพิเศษฉบับนี้จนสำเร็จ

จิรวัฒน์ กองกิจ
ชัยวัฒน์ แก้วส่องใส
ณัฐพล สุขเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ฟิล์ม UNCD/a-C:H	3
2.2 ไดโอดเปล่งแสงรอยต่อเฮทเทอร์โรจังค์ชัน	4
2.3 การศึกษาหาค่า Z	7
2.3.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	7
2.3.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	7
2.3.3 กราฟของโบด (Bode plot)	12
2.3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของ Z	14
2.4 การเคลือบด้วยวิธี PLD	20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	22
3.1 การจัดเตรียมตัวอย่างเฮทเทอร์โรจังค์ชันโฟโตไดโอด	22
3.1.1 การจัดทำพี-เอ็นเฮทเทอร์โรจังค์ชันโฟโตไดโอด	22
3.1.2 การจัดทำขั้วอิเล็กโทรด	22
3.2 การวัดค่าลักษณะความสัมพันธ์ I-V และ Z-f	25
3.2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ I-V	26
3.2.2 ลักษณะความสัมพันธ์ Z-f	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	36
4.1 การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ $I - V$, $Z' - f$, $Z'' - f$ และ $Z'' - Z'$ ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B ในปริมาณที่ต่างกันในที่มืด	36
4.2 การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ $I - V$, $Z' - f$, $Z'' - f$ และ $Z'' - Z'$ ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B ในปริมาณที่ต่างกันในที่ฉายแสง	47
4.3 การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ $I - V$, $Z' - f$, $Z'' - f$ และ $Z'' - Z'$ ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N ในปริมาณ 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสง	56
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลงานวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2

3.1 แสดงเงื่อนไขของการสร้างพี-เอ็นเฮทเทอร์โรจังค์ชัน 22

4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 0.1% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลอง 44

4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 5% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลอง 45

4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 20% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลอง 46

4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 0.1% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลอง 53

4.5 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 5% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลอง 54

4.6 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 20% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลอง 55

4.7 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลอง 60

4.8 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ N 3% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลอง 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งด้านบนและ (ข) ภาพตัดขวางของฟิล์ม NCD โดยวิธีการตกเคลือบไอด้วยเคมีโดยใช้พลาสมาที่มีการเติม H บนพื้นผิว Si	4
2.2 (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งด้านบนและ (ข) ภาพตัดขวางของฟิล์ม UNCD โดยวิธีการตกเคลือบไอด้วยเคมีโดยใช้พลาสมาที่มีการเติมอาร์กอนบนพื้นผิว Si	4
2.3 รูปแผนภาพแถบพลังงานของ (ก) ชนิดเอ็นและชนิดพีสารกึ่งตัวนำช่องว่างพลังงานแตกต่างกันและ (ข) เฮทเทอร์โรจังค์ชันที่สมดุลความร้อน	5
2.4 (ก) สัดส่วนของโฟโตไดโอด (ข) แผนภาพไดโอดเปล่งแสงรอยต่อพี-เอ็น	6
2.5 แสดงแผนภาพแถบพลังงานระหว่างโฮโมจังค์ชันกับเฮทเทอร์โรจังค์ชัน	6
2.6 กราฟของไนควิสต์ที่ระบุค่า Z ของวงจร RC ต่ออนุกรม	7
2.7 วงจร RC ที่มีการต่อกันแบบขนาน	8
2.8 กราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ที่มีการต่อกันแบบขนานที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น	9
2.9 วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี (ข,จ) และแอตมิตแตนซ์สเปกโตรโคปี (ค,ฉ)	10
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว	12
2.11 (ก) แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด (ข) แสดงกราฟของ Z ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	13
2.12 วงจรสมมูล R_p กับ C_p และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R (ก) แสดงวงจรสมมูล R_p กับ C_p ต่อขนานกัน (ข) แสดงค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	14
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของ Z กับ f (ก) ในกรณีที่ C มีค่าต่ำ (ข) ในกรณี R มีค่าต่ำมาก	16
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\|Z\|$ กับ f	17
2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ f และ $-Z''$ กับ f	17
2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$	18
2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\|Z\|$ กับ f	18
2.18 (ก) แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ข) กราฟของไนควิสต์	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 (ก) แสดงแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ข) กราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว	20
2.20 รูปแสดงขั้นตอนการเคลือบด้วยวิธี PLD	20
2.21 แสดงหลักการ PLD ในการขจัดวัสดุออกจากผิวเป้าหมาย	21
3.1 แผนภาพตัวอย่างพี-เอ็นเฮทเทอร์โรจังค์ชันโฟโตไดโอดของ UNCD/a-C:H กับ Si ที่มีการเจือสาร B 0.1 %	23
3.2 (ก) การวางตัวอย่างในเครื่องสปัตเตอริง และ (ข) แผ่นเป้า Pd	23
3.3 (ก) ปุ่มควบคุมปริมาณความดัน (ข) เปิด/ปิดแก๊สอาร์กอน	24
3.4 แสดงกระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดด้วย Pd	24
3.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการสร้างขั้วอิเล็กโทรด	25
3.6 ภาชนะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่าง	25
3.7 (ก) ระบบวางชิ้นงานที่มีโพรบด้านใน (ข) การจัดวางแสง UV เพื่อศึกษาการตอบสนองของแสงต่อเฮทเทอร์โรจังค์ชัน	26
3.8 (ก) เครื่องวัดค่า *I-V* และ *Z-f* (ข) เครื่อง Keithley 2400 สำหรับการวัดลักษณะความสัมพันธ์ *I-V* (ค) แสดงขั้นตอนการเปิดเครื่อง Agilent E5250A	27
3.9 แสดงขั้นตอนการเปิดคอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานโปรแกรม I-V and C-V	27
3.10 แสดงโฟล์เดอร์ตัวเลือกโหมดการวัด	28
3.11 แสดงโหมดการวัด *CV - IV*	28
3.12 แสดงการตั้งค่าช่วง *V* ที่จะทำการวัด	29
3.13 แสดงขั้นตอนบันทึกค่าไฟล์งาน	29
3.14 (ก) ขั้นตอนการวัดค่าความสัมพันธ์ *I-V* (ข) แสดงค่าที่วัดได้และกราฟของความสัมพันธ์ *I-V*	30
3.15 การวัดลักษณะความสัมพันธ์ *R-X*	31
3.16 การตั้งค่าการวัดโหมด *R-X*	31
3.17 (ก) ตั้งค่า *f* เริ่มต้น (ข) ตั้งค่า *f* ค่าสุดท้าย	32
3.18 (ก) แสดงการบันทึกค่าที่ตั้งค่าไว้ (ข) คำสั่งเตรียมพร้อมที่จะทำการวัดค่า	33
3.19 (ก) ตรวจเช็คความถูกต้องในการตั้งค่า (ข) เสียบ Flash drive และกดปุ่ม “DC Bias” เพื่อวัดโหมด DC	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องระหว่างทำการวัด	35
3.21 แสดงตัวอย่างค่า *R-X* ที่ได้จากการวัด	35
4.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง *I-V* ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่มืด	37
4.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่มืด	38
4.3 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่มืด	39
4.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z''กับ Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่มืด	40
4.5 วงจรสมมูลของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือสาร B ในที่มืด	41
4.6 แสดงโปรแกรม Origin เพื่อใช้ในการสร้างกราฟและบันทึกข้อมูล	42
4.7 โปรแกรม EC-Lab แสดงข้อมูลกราฟจากการวัดค่า	42
4.8 แสดงวงจรสมมูลและสมการที่สอดคล้อง	43
4.9 แสดงค่า *R, CPE,* α ที่จำลองค่าที่เหมาะสมได้จากวงจร	43
4.10 วงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน UNCD/a-C:H/Si ที่มีการเจือ B 0.1%, 5% และ 20% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร	47
4.11 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *I* กับ *V* ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่ฉายแสง	48
4.12 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่ฉายแสง	49
4.13 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z''กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5%, และ (ค) 20% ในที่ฉายแสง	51
4.14 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'' - Z'$ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่ฉายแสง	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.15 วงจรสมมูลของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z'ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B ในที่ฉายแสง 53

4.16 วงจรสมมูลของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 0.1%, 5% และ 20% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร 55

4.17 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง I - V ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสง 56

4.18 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสง 57

4.19 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในมืดและในที่ฉายแสง 58

4.20 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' - Z'ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสง 59

4.21 วงจรสมมูลของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z'ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและที่ฉายแสง 60

4.22 วงจรสมมูลของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	ความหมาย
PLD	วิธีเคลือบด้วยพัลล์เลเซอร์ (Pulse Laser Deposition)
n	ฟิล์มบางมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำประจุลบ
p	ฟิล์มบางมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำประจุบวก
B	โบรอน
N	ไนโตรเจน
Si	ซิลิกอน
f	ความถี่; (Hz)
Z	ความต้านทานเชิงซ้อน; (Ω)
Z'	ความต้านทานเชิงซ้อนส่วนจริง; (Ω)
Z''	ความต้านทานเชิงซ้อนส่วนจินตภาพ; (Ω)
G	สภาพนำไฟฟ้า; (S)
R	ความต้านทาน; (Ω)
I	กระแสไฟฟ้า; (A)
V	แรงดันไฟฟ้า; (V)
C	ตัวเก็บประจุ; (F)
CPE	อิลิเมนต์เฟสคงที่; (F)
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน; (eV)
E_{ea}	สัมพรรคภาพอิเล็กตรอน; (eV)
E_C	ช่องว่างแถบนำไฟฟ้า; (eV)
E_f	ระดับพลังงานเฟอมิ; (eV)
Z_R	ความต้านทานเชิงซ้อนของความต้านทาน; (Ω)
Z_C	ความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเก็บประจุ; (Ω)
Y_a	แอดมิตแตนซ์; (s)
τ_D	ค่าเวลาผ่อนคลายไดเล็กทริก; (s)
ε	สภาพยอมทางไฟฟ้า
τ	ค่าคงตัวเวลา; (s)
ϕ	ค่าของมุม; (°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	ความหมาย
ω	ความเร็วเชิงมุม; (rad/s)
θ	มุมเฟส; (°)
α	ส่วนมุมกด; (rad)
X_c	ค่าจินตภาพของความจุ; (F)
R_s	ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม; (Ω)
R_p	ค่าความต้านทานที่ต่อขนาน; (Ω)
T	ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่
P	เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วย
D	แฟกเตอร์สูญเสีย
Q	แฟกเตอร์คุณภาพ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ฟิล์มผลึกขนาดอัลตร้านาโนไดมอนด์/อะมอฟัสคาร์บอนที่มีการเติมไฮโดรเจน (Ultrananocrytalline diamond/hydrogenated amorphous carbon composit; UNCD/a-C:H) [1] มีโครงสร้างฟิล์มอย่างเฉพาะเจาะจงในที่ซึ่งจำนวนมากของเม็ดผลึกระดับนาโนของไดมอนด์ถูกฝังตัวในโครงสร้าง a-C:H ได้ถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบเชิงกลและเชิงไฟฟ้าในระดับไมโคร (MENS), การเคลือบแข็งและสิ่งประดิษฐ์ทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เพราะว่า UNCD/a-C:H มีคุณสมบัติที่เฉพาะเจาะจงดังต่อไปนี้: (i) มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่สูงกว่าคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC): (ii) ง่ายต่อการปลูกในฐานรองที่มีสถานะของแข็งซึ่งเป็นสิ่งที่ตรงข้ามกับการปลูกของฟิล์มไดมอนด์ผลึกเดียวและผลึกหลายรูป: (iii) การมีอยู่ของคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าและแสงโดยเฉพาะเจาะจงเนื่องจากจำนวนมากของขอบเขตของเม็ดผลึก (Grain boundaries; GBs) ฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่ถูกเตรียมโดยการเคลือบแบบพัลล์เลเซอร์มีสัมประสิทธิการดูดแสงสูงมากกว่า 10^5 ในช่วงพลังงานโฟตอนระหว่าง 3 eV และ 6 eV ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าการมีอยู่ของ GBs นอกจากนี้อะตอมที่ถูกเจือจะเข้าไปมีส่วนรวมในขอบของเม็ดผลึกและการนำไฟฟ้าชนิดพี และเอ็นจะถูกทำขึ้นมาโดยการเจือโบรอน (Boron; B) และ ไนโตรเจน (Nitrogen; N) ซึ่งส่งผลในการเพิ่มการนำไฟฟ้า ก่อนหน้านี้ฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่ถูกเจือ B ได้ถูกเตรียมบนฐานรองซิลิกอน (Silicon; Si) ชนิดเอ็นและฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่เจือด้วยเจือด้วย N ได้ถูกเตรียมบนฐานรอง Si ชนิดพี เป็นผลให้เฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ประกอบไปด้วยฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่เจือด้วย B ชนิดพีและฐานรอง Si ชนิดเอ็น รวมทั้งเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ประกอบไปด้วย UNCD/a-C:H ที่เจือด้วย N ชนิดเอ็นและ Si ชนิดพีได้ถูกสร้างขึ้นมา และได้มีการยืนยันการแสดงคุณสมบัติการเรียงกระแส

งานวิจัยนี้เพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าของเฮทเทอร์โรจังค์ชันดังที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจะทำการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance; Z) ที่รอยต่อของเฮทเทอร์โรจังค์ชันทั้งสองแบบโดยเป็นฟังก์ชันกับความถี่ (frequency; f) จากข้อมูลที่ผู้วิจัยได้ศึกษามายังไม่พบถึงการรายงานลักษณะเฉพาะของ Z ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันของฟิล์ม UNCD ที่ถูกเจือด้วย B และ Si ที่เปอร์เซ็นต์การเจือ B ที่ต่างกัน และศึกษาผล Z ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันของ UNCD ที่ถูกเจือด้วย N และ Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ศึกษา Z ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ประกอบไปด้วยฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่เจือด้วย B และ Si และฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่เจือด้วยสาร N และ Si ที่มีค่า f ต่างกัน
2) ศึกษาผลของปริมาณการเจือสาร B และ N ลงในฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่มีผลต่อค่า Z
3) วิเคราะห์แบบจำลองของวงจรสมมูลจากลักษณะของค่า Z ที่ได้จากการวัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ประกอบไปด้วยฟิล์ม UNCD/a-C:H และ Si ซึ่งถูกสร้างด้วยวิธีพัลสเลเซอร์ (Pulse laser deposition; PLD)
2) ค่า Z ถูกวัดในช่วง f 20 Hz - 2 MHz โดยใช้เครื่องวัด LCR (รุ่น Agilent E4980A)
3) สาร B จะถูกเจือลงไปในฟิล์ม UNCD/a-C:H ด้วยอัตราส่วนที่ต่างกันเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อค่า Z
4) สาร N จะถูกเจือลงไปในฟิล์ม UNCD/a-C:H ในปริมาณ 3% เพื่อศึกษาค่า Z

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาหลักการและงานวิจัยที่สอดคล้องกับโครงงานพิเศษ	←	→								
ทำการเตรียมเฮทเทอร์โรจังชันโดยวิธี PLD			←	→						
เรียนรู้การใช้เครื่องวัด LCR (รุ่น Agilent E4980A) ที่ใช้วัดค่า Z				←	→					
วัดค่า Z ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N กับ B ในปริมาณที่ต่างกัน						←	→			
วิเคราะห์แบบจำลองวงจรสมมูลจากค่า Z								←	→	
เรียบเรียงเนื้อหา ผลการทดลองและจัดทำรูปเล่ม									←	→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบถึงขั้นตอนการวัดค่า Z ของเฮทเทอร์โรจังค์ที่ประกอบด้วยฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่เจือด้วยสาร B และ N และ Si
2) ทราบถึงผลของปริมาณการเจือ B ลงใน UNCD/a-C:H ฟิล์ม ที่มีผลต่อค่า Z
3) ทราบถึงวงจรสมมูลของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน UNCD/a-C:H ที่มีการเจือ B และ N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเตรียมเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่ประกอบด้วยฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่เจือด้วย B และ Si และฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่เจือด้วย N และ Si ด้วยวิธีการการเคลือบเชิงไอทางฟิสิกส์ และศึกษาลักษณะเฉพาะของ Z - f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน ศึกษาผลของปริมาณการเจือ B และ N ลงในฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่มีต่อลักษณะเฉพาะของค่า Z รายละเอียดของเทคนิคและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะแสดงด้านล่าง

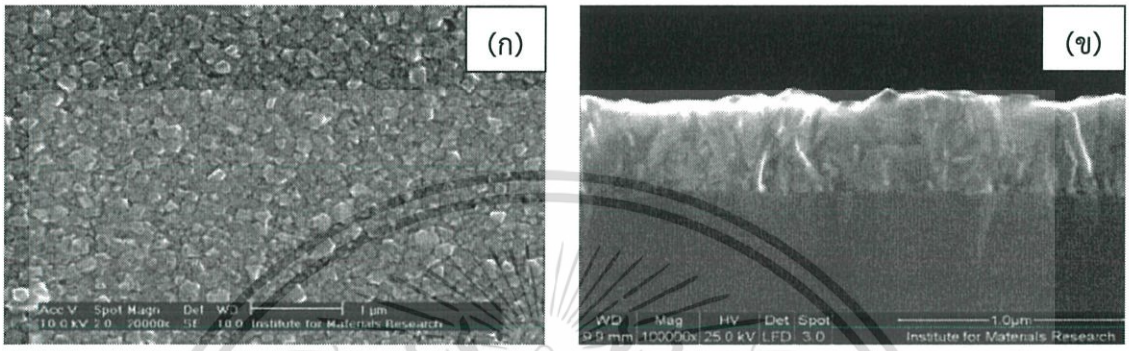
2.1 ฟิล์ม UNCD/a-C:H [2]

เมื่อเร็วๆ นี้ ฟิล์มที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นเพชรเม็ดเล็กๆ ซึ่งเป็นผลึกนาโนไดมอนด์ (NCD) และ UNCD ได้รับความสนใจในด้านการวิจัย ฟิล์มชนิดนี้มีลักษณะที่น่าสนใจเมื่อเทียบกับผลึกเดี่ยวและผลึกหลายรูปของไดมอนด์ตัวอย่างเช่น สามารถปลูกผลึกได้บนพื้นผิวที่หลากหลายอาทิเช่น แก้ว, สแตนเลส, พลาสติก, ซิลิกอนและวัสดุหลายชนิดทั้ง NCD และ UNCD ได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุในการสร้างอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์วิทยาศาสตร์ขนาดเล็กในระดับไมโครไปจนถึงนาโน, การฉายแสง, การจัดการความร้อน, ไฟฟ้าเคมี, และไบโออิเล็กทรอนิกส์ ฟิล์ม NCD และ ฟิล์ม UNCD มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน จากมุมมองของโครงสร้างฟิล์ม NCD สามารถปลูกผลึกได้โดยทั่วไปด้วยวิธีการตกเคลือบไอด้วยเคมีภายใต้สภาพพลาสมาที่อุดมด้วยไฮโดรเจนอะตอมส่งผลให้เมล็ดผลึกมีขนาดเท่ากันและขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มเนื่องจากชนิดของคอลัมน์ของการเจริญเติบโตของฟิล์ม NCD มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 100 นาโนเมตร NCD มีประโยชน์มากสำหรับการประยุกต์ใช้ทางไฟฟ้าเคมี ส่วนฟิล์ม UNCD ซึ่งประกอบไปด้วยนาโนไดมอนด์เม็ดเล็กละเอียดที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 5-10 นาโนเมตรโดยทั่วไปจะถูกสังเคราะห์โดยวิธีการตกเคลือบไอด้วยเคมีโดยใช้พลาสมาของอาร์กอนและจากข้อสังเกตในด้านไฟฟ้ากลไกการนำไฟฟ้าของ NCD และ UNCD มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ในฟิล์ม NCD การนำไฟฟ้าอาศัยการแทนที่จากการเติมของไดมอนด์แลตทิตเช่นเดียวกับฟิล์มผลึกเดี่ยวและฟิล์มผลึกหลายรูปของไดมอนด์ที่เจือด้วย B ชนิดพีเป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่มีพลังงานกระตุ้น 0.37 eV และที่น่าสนใจคือจะมีความเป็นตัวนำยิ่งยวดหากมีการเติม B จำนวนมาก แต่ในทางกลับกันในฟิล์ม UNCD สามารถทำให้ชนิดเอ็นนำไฟฟ้าได้โดยการเติม N การไหลของกระแสไฟฟ้านี้ถูกควบคุมโดยขอตเขตการนำไฟฟ้าของเมล็ดผลึก

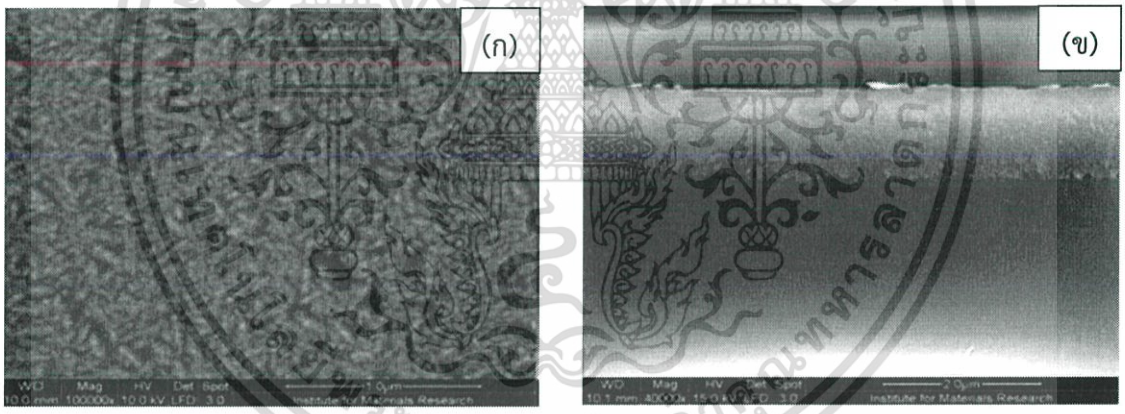
ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งด้านบนและภาพตัดขวางของฟิล์ม NCD และฟิล์ม UNCD แสดงในรูปที่ 2.1 (ก, ข) และรูป 2.2 (ก, ข) ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าแผ่นฟิล์ม NCD มีขนาดเมล็ดเฉลี่ยน้อยกว่า 100 นาโนเมตรจากมุมมองด้านบน ส่วนภาพตัดขวางด้านขวาของรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าวัสดุนี้ไม่แสดงโครงสร้างคอลัมน์และมีความแตกต่างกันโดยพื้นฐานไปจนสู่การเจริญเติบโตในฟิล์ม NCD นี่เป็นสาเหตุของอัตราการเกิดขึ้นใหม่ของนิวเคลียสสูงในสภาวะพลาสมานำไปสู่การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างเมล็ดคริสตัลใหม่อย่างต่อเนื่องและทำให้ขนาดเมล็ดสูงสุดมีจำกัด ความขรุขระของพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม UNCD ค่อนข้างเรียบกว่าฟิล์ม NCD เนื่องจากมีการเติบโตของฟิล์มที่เป็นเอกลักษณ์ และในการสร้างวัสดุนี้มีอยู่สองขั้นตอนคือสร้างในเมล็ดเกรนและสร้างที่ขอบเขต ผลึก NCD ยังมีเส้นขอบของเมล็ดอยู่ในฟิล์ม อย่างไรก็ตามก็เป็นอัตราส่วนที่น้อยในความเป็นจริงน้อยมากเมื่อเทียบกับ 10% ของคาร์บอนใน UNCD ที่ขอบเขตเกรน และความแตกต่างในการกำหนดค่าคาร์บอนคือลักษณะของรามานรามานเสปคโทรสโคปี



รูปที่ 2.1 (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งด้านบนและ (ข) ภาพตัดขวางของฟิล์ม NCD โดยวิธีการตกเคลือบไอด้วยเคมีโดยใช้พลาสมาที่มีการเติม H บนพื้นผิว Si



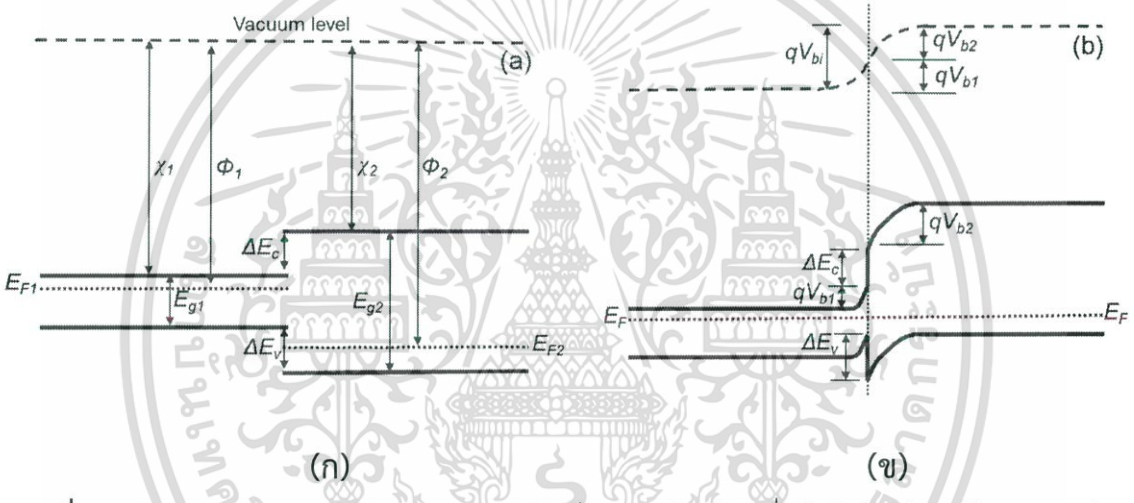
รูปที่ 2.2 (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งด้านบนและ (ข) ภาพตัดขวางของฟิล์ม UNCD โดยวิธีการตกเคลือบไอด้วยเคมีโดยใช้พลาสมาที่มีการเติมอาร์กอนบนพื้นผิว Si

2.2 ไดโอดเปล่งแสงรอยต่อเฮทเทอร์โรจังค์ชัน [3]

โดยทั่วไปเฮทเทอร์โรจังค์ชันหมายถึงรอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างสารกึ่งตัวนำที่ไม่เหมือนกัน วัสดุเหล่านี้มีช่องว่าแถบพลังงานไม่เท่ากันเมื่อเทียบกับโฮโมจังค์ชัน โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุสองชนิดแตกต่างกันนำไปสู่การก่อตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆ รอยต่อ ถ้าวัสดุสองชนิดมีคุณสมบัติคล้ายกันกับค่าการนำไฟฟ้าเรียกรอยต่อนั้นว่าเฮทเทอร์โรจังค์ชัน แถบพลังงานของเฮทเทอร์โรจังค์ชันไม่ได้เป็นไปอย่างต่อเนื่องเนื่องจากความแตกต่างในสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน แผนภาพแถบพลังงานของทั้งสองวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทตรงข้ามก่อนที่จะมีการจัดเรียงของรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.3 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำทั้งสองที่แตกต่างกัน เช่น ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap; E_g) แตกต่างกันกับสภาพยอม (permittivity; ε) ฟังก์ชันงาน (work function; ϕ) และ สัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (electron affinity; E_{ea}) มีความแตกต่างกัน ความสัมพันธ์อิเล็กตรอนและฟังก์ชั่นงานของสารกึ่งตัวนำที่ได้รับจะถูกกำหนดตามลำดับเนื่องจากพลังงานที่จำเป็นที่จะเอาอิเล็กตรอนจากด้านล่างของแถบนำ (conduction band energy; E_c) และจากระดับพลังงานเฟอมิ (fermi energy; E_f) ไปที่ระดับสุญญากาศ ตัวห้อย 1 และ 2 หมายถึงสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีจะเห็นได้จากรูป 2.3 (ก) ที่ขอบของแถบนำ (ΔE_c) จะเท่ากับความแตกต่างของสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่สอง (ข) รูปแสดงไดอะแกรมแถบพลังงานของเฮทเทอโรจังค์ชันพี-เอ็นที่มีความสมดุลทั้งหมดสร้างในแรงดันไฟฟ้า (V_{bi}) เนื่องจากความแตกต่างในฟังก์ชันงาน ($\phi_1 - \phi_2$) เท่ากับผลรวมของ V ในทั้งสองด้าน ($V_{bi} = V_{b1} + V_{b2}$)

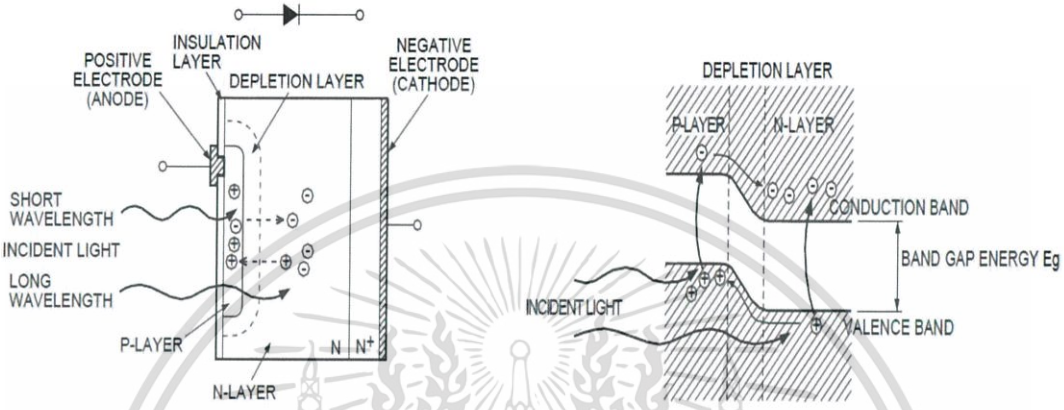


รูปที่ 2.3 รูปแผนภาพแถบพลังงานของ (ก) ชนิดเอ็นและชนิดพีสารกึ่งตัวนำช่องว่างพลังงานแตกต่างกันและ (ข) เฮทเทอร์โรจังค์ชันที่สมดุลความร้อน

ไดโอดเปล่งแสง [4] เป็นเซนเซอร์แสงที่สร้างกระแสหรือแรงดันที่รอยต่อ พี-เอ็น โฟโตไดโอดสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางแต่มักจะใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสงในโหมดการนำกระแสด้วยแสง โฟโตไดโอดมักจะเป็นไบอัสกลับ ซึ่งไปลดความจุของรอยต่อทำให้มีการตอบสนองเร็วขึ้น [5-10] ไดโอดเปล่งแสงสามารถจำแนกได้ตามโครงสร้างดังนี้: (i) พี-เอ็น ไดโอด: (ii) พี-ไอ-เอ็นไดโอด: (iii) โฟโตไดโอดชนิดช็อทกี้ไดโอด: (iv) โฟโตไดโอดชนิดอวาเลนช์ [11] ไอโอดทุกประเภทเหล่านี้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการตรวจสอบความเข้ม ตำแหน่ง สีและการปรากฏการณ์ของแสง เมื่อแสงส่องโฟโตไดโอดจะเป็นการกระตุ้นอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างผลึก ถ้าพลังงานแสงมากกว่า E_g อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากแถบวาเลนช์ไปยังแถบนำดังภาพที่ 2.4 คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะเกิดขึ้นตลอดในชั้นของชั้นพีที่มีการสูญเสียและชั้นของเอ็นในชั้นที่มีการสูญเสีย สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ไปยังชั้นเอ็นและโฮลไปทางชั้นพี อิเล็กตรอนของคู่อิเล็กตรอนโฮลสร้างชั้นเอ็นพร้อมกับอิเล็กตรอนที่มาจากชั้นพีอยู่ในแถบนำเอ็นโฮลในขณะนี้มีการกระจายผ่านชั้นเอ็นถึงชั้นสูญเสียขณะ

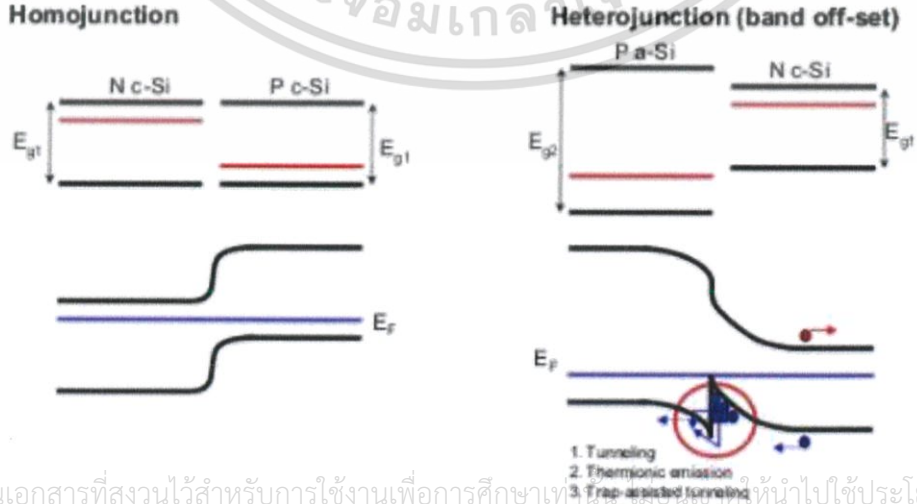
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เร่ง และรวบรวมไว้ในแถบวาเลนซ์ชั้นพี ในลักษณะนี้คู่อิเล็กตรอนโฮลที่สร้างสัดส่วนปริมาณของแสงที่ตกกระทบจะถูกรวบรวมในชั้นเอ็นและชั้นพี ผลลัพธ์ที่ได้คือชั้นพีเป็นประจุบวกส่วนชั้นเอ็นเป็นประจุลบ ถ้าวงจรภายนอกเชื่อมต่อระหว่างชั้นพีและเอ็น อิเล็กตรอนจะไหลออกไปจากชั้นเอ็นและโฮลจะไหลออกไปทางขั้วตรงข้าม อิเล็กตรอนและโฮลที่สร้างกระแสที่ไหลผ่านในตัวสารกึ่งตัวนำเหล่านี้จะเรียกว่าพาหะ



รูปที่ 2.4 (ก) สัดส่วนของโฟโตไดโอด (ข) แผนภาพไดโอดเปล่งแสงรอยต่อพี-เอ็น

โฮโมจังค์ชันเป็นรอยแบบสารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เหมือน วัสดุเหล่านี้มีช่องว่างแถบพลังงาน แต่โดยทั่วไปจะมีการเจือที่มีความแตกต่างกัน ส่วนมากในทางปฏิบัติโฮโมจังค์ชันจะเกิดระหว่างชนิดเอ็น (ผู้ให้) และชนิดพี (ผู้รับ) ในสารกึ่งตัวนำ เช่น Si จะเรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งไม่ใช่เงื่อนไขที่จำเป็นเพียงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำที่เหมือนกัน (ช่องว่างแถบพลังงานเหมือนกัน) ซึ่งจะแตกต่างกับเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีรอยต่างที่ต่างชนิดกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพแถบพลังงานระหว่างโฮโมจังค์ชันกับเฮทเทอร์โรจังค์ชัน [12]

2.3 การศึกษาค่า Z

2.3.1 วงจร RC ที่มีการต่อแบบอนุกรม [13]

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมกัน อิมพีแดนซ์ลัพธ์จะมีค่าเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \tag{2.1}$$

ค่า Z_C จะขึ้นอยู่กับ f ดังนั้น จำเป็นที่จะต้องเขียนค่าของ Z_C ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของ Z

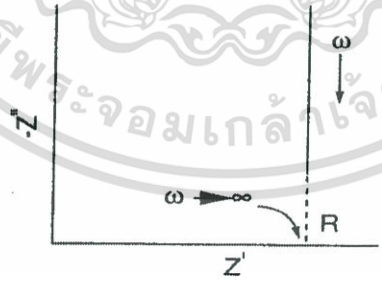
โดยที่ $$j = \sqrt{-1} \tag{2.2}$$

ดังนั้น $$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{j\omega} \tag{2.3}$$

และ $$Z_C = R_S \tag{2.4}$$

แล้วจะได้ว่า $$Z_{RC} = R_S - \frac{j}{\omega C} \tag{2.5}$$

โดยที่ R_S เป็นจำนวนจริงของ Z ส่วน $\frac{1}{j\omega C}$ เป็นจำนวนจินตภาพของ Z เมื่อ f เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี C มีค่ามากแล้วจะได้ว่า Z_{RC} เข้าสู่ค่า R_S จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน Z' จะเป็นค่าของ Z_R ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟของไนควิสต์ที่ระบุค่า Z ของวงจร RC ต่ออนุกรม

2.3.2 วงจร RC ที่มีการต่อแบบขนาน

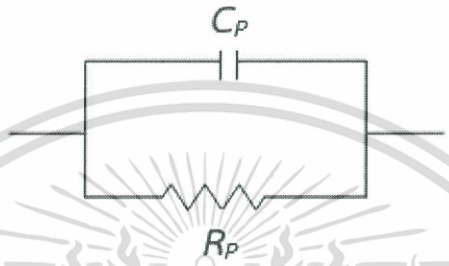
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อกันแบบขนานดังรูปที่ 2.7 แล้ว Z จะมีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \tag{2.6}$$

ให้ $Z_R = R_P$ ดังรูปที่ (2.7) ดังนั้น สมการ (2.6) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_P} + j\omega C = \frac{(1 + j\omega R_P C}{R_P} \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.7 วงจร *RC* ที่มีการต่อกันแบบขนาน

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกันจำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต (1 - $j\omega R_P C$) คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{(Z\omega R_P C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_P(j\omega R_P C - 1)} \tag{2.8}$$

$$= -\left[\frac{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1}{R_P(j\omega R_P C - 1)}\right] \tag{2.9}$$

ดังนั้น

$$Z_{RC} = -\left[\frac{j\omega R_P^2 C - R_P}{\omega^2 R_P^2 C + 1}\right] \tag{2.10}$$

$$Z_{RC} = \frac{R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} - j\left(\frac{\omega R_P^2 C}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1}\right) = Z' - jZ'' \tag{2.11}$$

โดยที่

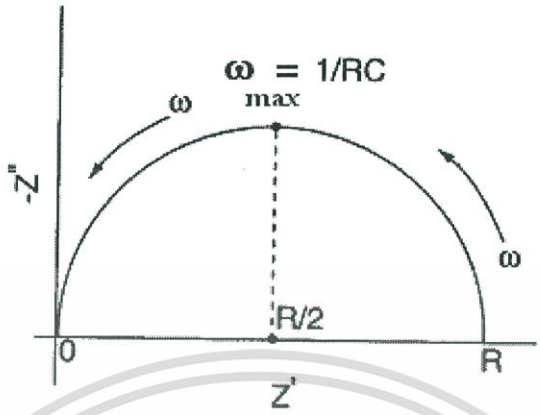
$$Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = \frac{R_P}{(\omega\tau)^2 + 1} \tag{2.12}$$

และ

$$Z'' = \frac{\omega R_P^2 C}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = R_P\left[\frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1}\right] \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ τ = ค่าคงตัวเวลา (time constant) = R_pC และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ที่มีการต่อกันแบบขนานจะแสดงดังรูปที่ 2.8

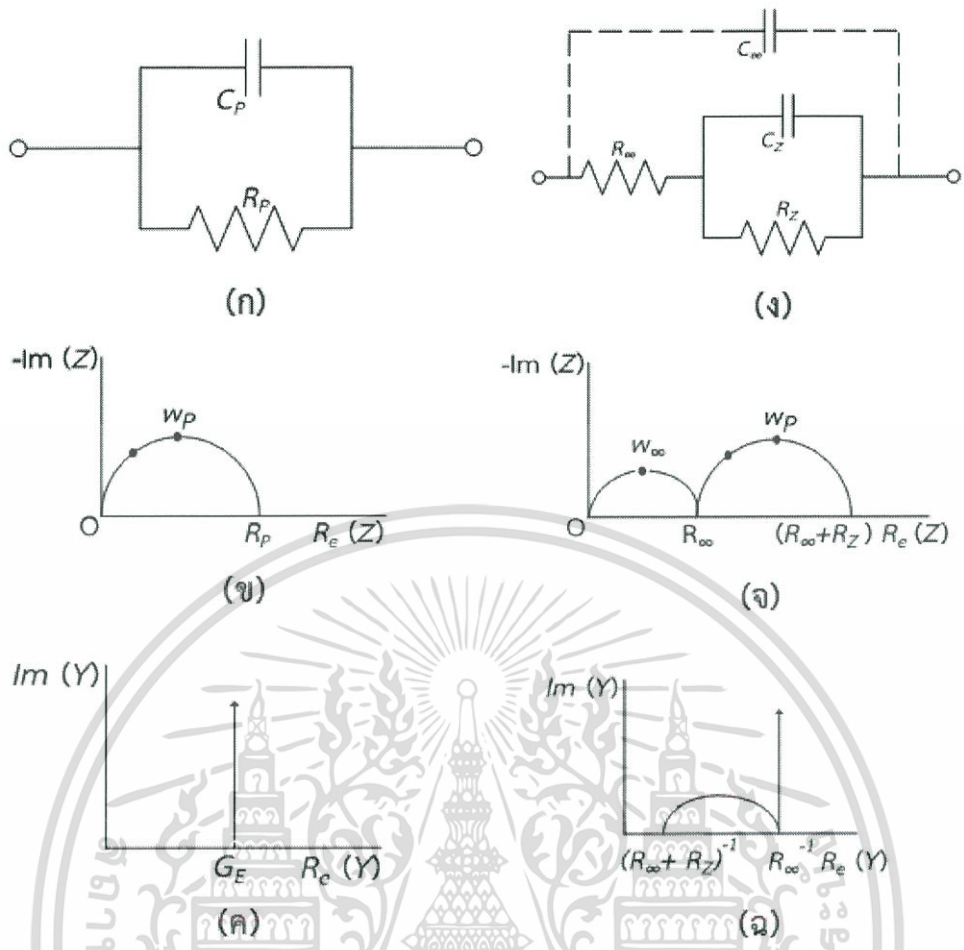


รูปที่ 2.8 กราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ที่มีการต่อกันแบบขนานที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น

เมื่อ
$$\omega = \frac{1}{RC} \tag{2.14}$$

วงจร RC ที่มีการต่อกันแบบขนานสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี (ข,จ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรโคปี (ค,ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance; C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_∞ หรือ C_1 ในรูปที่ 2.9 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resisitance ; R_b) ซึ่งก็คือ R_∞ หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau = R_\infty C_\infty = R_1 C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั่นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุด คือ ω_P และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.9 (ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_P \tau_D = 1$ โดยทั่วไป $\tau_D < 10^{-7}\ s$ ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ($\omega_{\max}$) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max}\tau_D \leq 1$ มักจะไม่ปรากฏค่า Z' ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว τ_D จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max}\tau_D \geq 1$แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี กล่าวคือกราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากกรณีที่ $R_1 = R_\infty$ และ $C_1 = C_\infty$ ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้ $R_1 = R_R$ และ $C_1 = C_R$ เมื่อ R_R คือ ความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วนคือ C_R ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาไรเซชัน (polarization region) ในสารละลายที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร *RC* ของรูปที่ 2.9 (ง) ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนรูป 2.10 (จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงที่ของเวลาคือ $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไข่ปลาดังรูปที่ 2.10 (จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ f สูงมากกว่า f ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของ f ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\mathrm{Im}(Z)$ กับ $\mathrm{Re}(Z)$ มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\mathrm{Im}(Z)$ กับ $\mathrm{Re}(Z)$ เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอตแรนท์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น $Z = Z' - jZ''$ และเขียน $\mathrm{Im}(Z)$ แทน $-\mathrm{Im}(Z)$

สำหรับแอตมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีของวงจร *RC* ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.9 (ก) ค่าแอตมิตแตนซ์ลัพธ์คือ ผลรวมของแอตมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอตมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (ωC_1) ดังนั้นจะได้ว่า

เมื่อ
$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \tag{2.15}$$

กราฟของสมการที่ (2.15) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.9 (ค) ส่วนแอตมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.9 (ง) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (2.9)
ซึ่งกราฟของสมการ (2.9) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.9 (ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.9 (ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่า f เอาไว้ ซึ่ง f เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน $\log f$ เพื่อให้เป็น 3 มิติ

ในกรณีทั่วๆ ไปทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นกับ C และ R ซึ่งทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นอยู่กับ f และพบว่าและ Z' กับ Z'' มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \tag{2.16}$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \tag{2.17}$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมปรากฏในรูปที่ 2.9 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม (R_S) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 กราฟของโบด (Bode plot)

จาก $Z = Z' + jZ''$ สามารถจะเขียนอยู่ในแบบโคออร์ดิเนตตั้งฉาก (rectangular coordinate) และโคออร์ดิเนตเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.10 ดังนี้คือ

$$\mathrm{Re}(Z) \equiv Z' = |Z|\cos\phi \tag{2.18}$$

และ

$$\mathrm{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z|\sin\phi \tag{2.19}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right) \tag{2.20}$$

โดยที่โมดูลัสคือ

$$|Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.21}$$

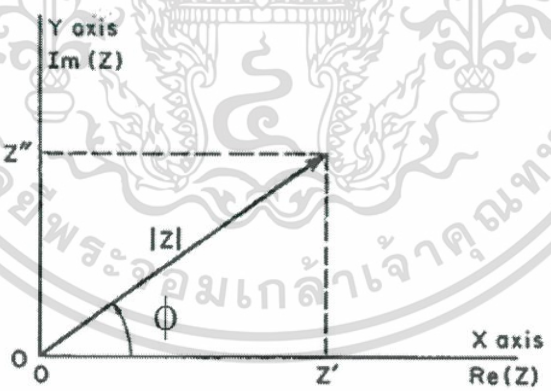
จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

จะได้ว่า

$$\exp(j\phi) = \cos\phi + j\sin\phi \tag{2.22}$$

ดังนั้น

$$Z = |Z|\exp(j\phi) \tag{2.23}$$



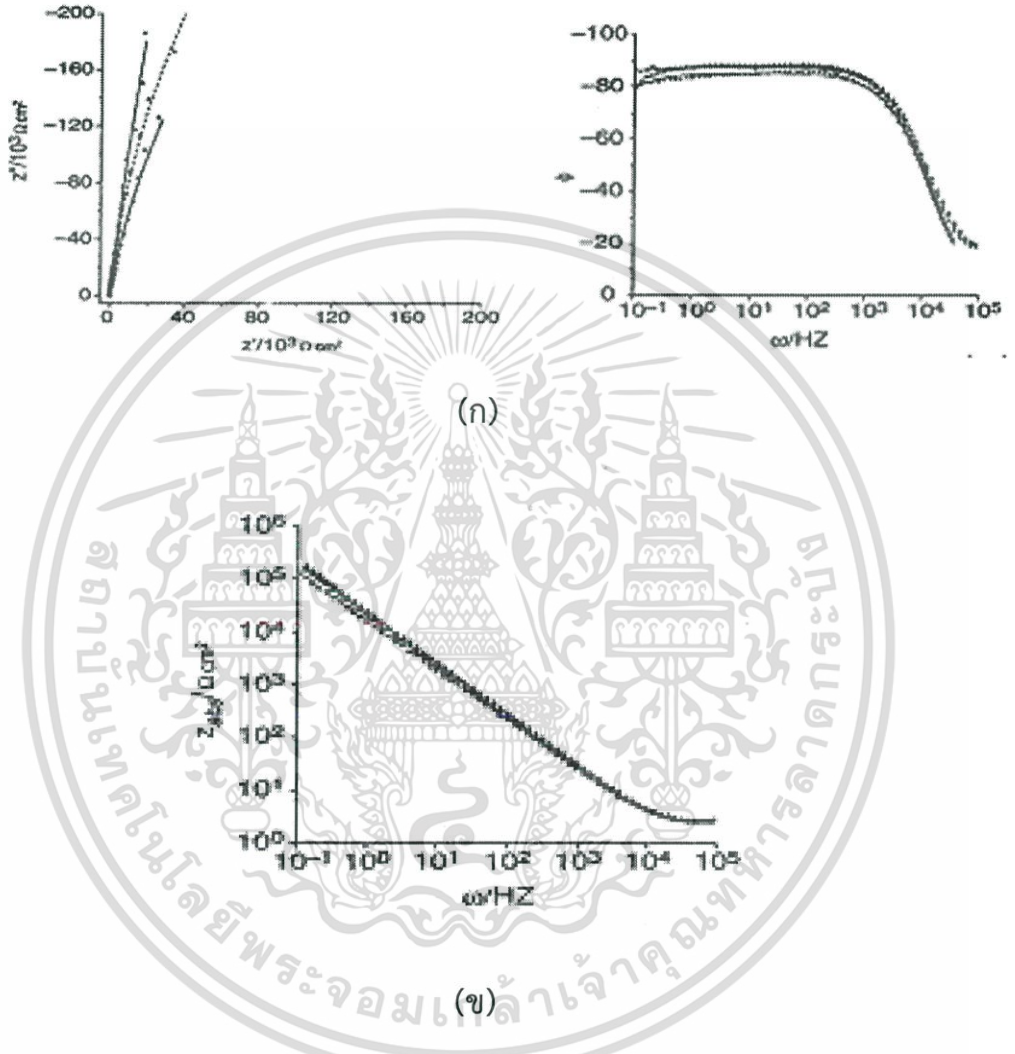
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว

มุมเฟสระหว่างทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับ f ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็น C สมบูรณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส ϕ = -90 องศา และมุมเฟสของ R จะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ f และมุมเฟสกับ f โดยแกน f จะเป็นลอกาลิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือทั้ง f สูงและที่ f ต่ำจะมีค่า Z เท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ค่า Z จะไปรวมอยู่ในย่าน f ค่าสูงๆ ในกรณี C สมบูรณ์ที่ $\omega \to 0$ แล้วมุมเฟส ϕ = -90 องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม -90 องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C แบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอิลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element; *CPE*) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับ *Z* และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.11 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลึกพหุพันธ์



รูปที่ 2.11 (ก) แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด (ข) แสดงกราฟของ *Z* ของวงจรที่มี C ของบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่า *Z* ของ *CPE* จะนิยามโดยค่าของ *T* และ *P* เมื่อ *T* คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับ *f* ส่วน *P* เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \le P \le 1$ แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ *Z* (*CPE*) จะเกี่ยวข้องกับ R และแปรตาม ω^{-P} ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่า *C* และแปรตาม ω^{-P} ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z(CPE) = \frac{1}{T(j\omega)^{P}} \tag{2.24}$$

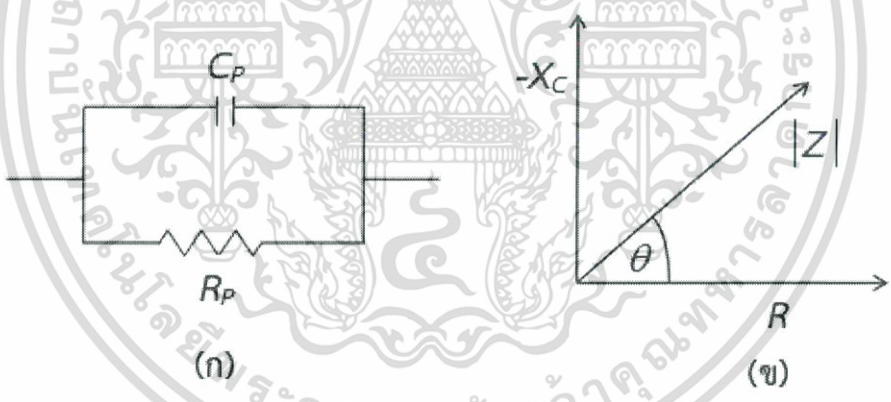
ส่วนความจุเนื่องจากบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด (double-layer capacitance ; C_{dl}) จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = \sqrt[P]{\frac{T}{R_S^{(P-1)}}} \tag{2.25}$$

พารามิเตอร์ P จะสัมพันธ์กับมุมเฟส ϕ ดังนี้คือ $\phi = P\left(\frac{\pi}{2}\right)$ ถ้ามุมเฟส ϕ เข้าใกล้ 1 ก็จะประพฤติตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์โดยที่มุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

2.3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของ Z

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายสมบัติของ Z ของรอยต่อพี-เอ็น คือ R_p ต่อขนานกับ C_p ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูล R_p กับ C_p และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R
(ก) แสดงวงจรสมมูล R_p กับ C_p ต่อขนานกัน
(ข) แสดงค่าสัมบูรณ์ของ Z

ค่าจินตภาพแห่งความจุ (capacitive reactance; X_c) คือ

$$X_c = \frac{1}{\omega C_P} \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเฟส θ จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan\theta = \frac{|X_C|}{R_P} = \frac{1}{\omega C_P R_P} \tag{2.27}$$

การสูญเสียพลังงานไปในวงจรจะแสดงผ่านทางแฟกเตอร์สูญเสีย (dissipation factor; D) คือ

$$D = \tan\theta = \frac{1}{\omega C_P R_P} \tag{2.28}$$

จะเห็นว่าเมื่อ f เพิ่มขึ้นแล้วแฟกเตอร์สูญเสียจะมีค่าลดลงและแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor; Q) คือ

$$Q = \frac{1}{D} = \omega R_P C_P \tag{2.29}$$

ในทางปฏิบัติฟังก์ชันที่ควรวัด คือ C_P-D, C_P-Q, C_P-G และ C_P-R_P โดยที่ G คือ ความนำไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$G = \frac{1}{R_P} \tag{2.30}$$

โดยทั่วไปที่ f ใดๆ ค่า Z จะเป็นดังสมการ

$$Z = Z' - jZ'' \tag{2.31}$$

และ

$$D = \frac{Z'}{Z''} \tag{2.32}$$

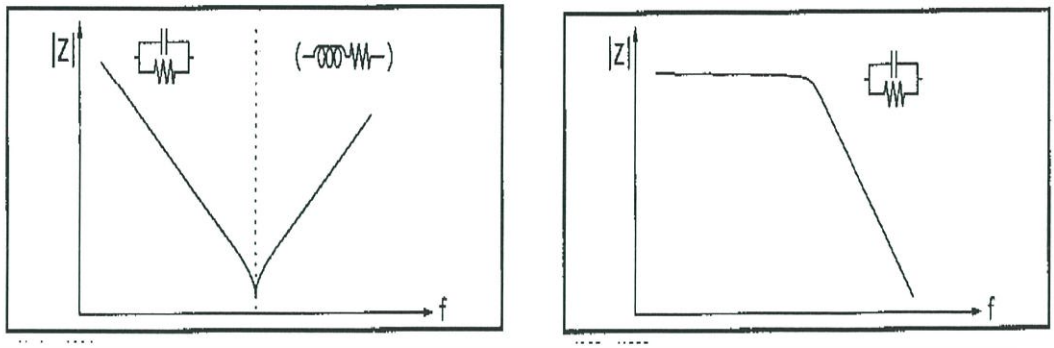
เมื่อ

$$Z' = \frac{R_P}{1 + \omega^2 C_P R_P^2} \tag{2.33}$$

$$Z'' = \frac{\omega C_P R_P^2}{1 + \omega^2 C_P R_P^2} \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ f จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



Small C (ก) Large R (ข)

รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของ Z กับ f (ก) ในกรณีที่ C มีค่าต่ำ (ข) ในกรณี R มีค่าต่ำมาก

โดยปกติสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับจะสอดคล้องกับสมการของจอนส์เชอร์ (Jonscher expression) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^{n} \tag{2.35}$$

เมื่อ n คือ เลขยกกำลัง Z' และ Z'' ของ Z คือ

คือ
$$Z' = \frac{R_P}{1+\omega^2 C_P^2 R_P^2} \tag{2.36}$$

และ
$$Z'' = \frac{-\omega C_P R_P^2}{1+\omega^2 C_P^2 R_P^2} \tag{2.37}$$

ซึ่งค่า R_p จะคำนวณได้จากจุดตัดแกน Z' ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$ ส่วนค่า C_p จะคำนวณได้จาก f ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม (semi-circular) ในกรณีอุดมคติที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม คือ $Z' = -Z''$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{R_P}{1+\omega^2 C_P^2 R_P^2} = \frac{\omega C_P R_P^2}{1+\omega^2 C_P^2 R_P^2} \tag{2.38}$$

จะได้ว่า
$$C_P = \frac{1}{\omega R_P} \tag{2.39}$$

ในทำนองเดียวกัน τ จะคำนวณได้จาก f สูงสุดของครึ่งวงกลม

$$\tau = \frac{1}{\omega_{\max}} = C_P R_P \tag{2.40}$$

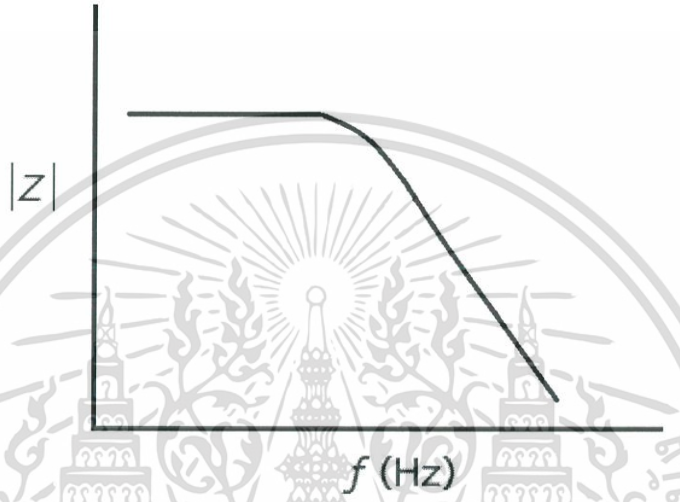
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$\omega_{max} = C_P R_P = 1 \quad (2.41)$$

จากค่า Z' และ Z'' จากสมการที่ (2.40) และ (2.41) จะได้ว่า

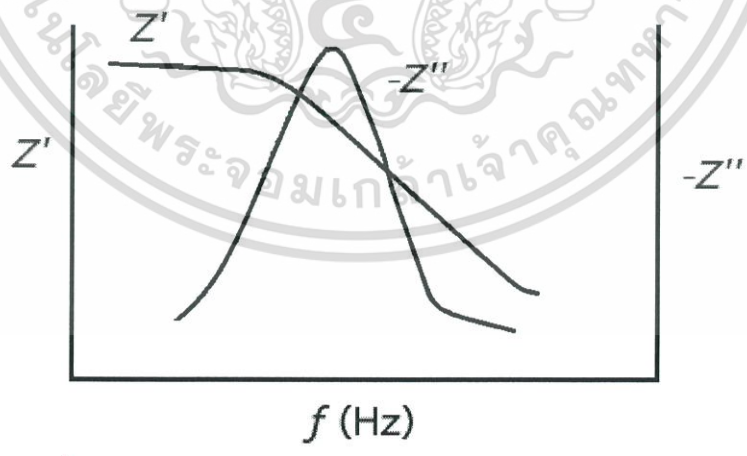
$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (2.42)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ f จะเขียนได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ f

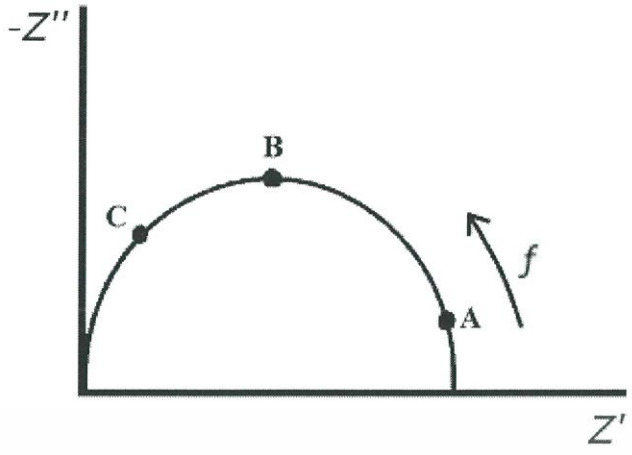
แต่ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ f และ $-Z''$ กับ f จะได้กราฟดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ f และ $-Z''$ กับ f

และถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$ จะได้กราฟดังรูปที่ 2.16

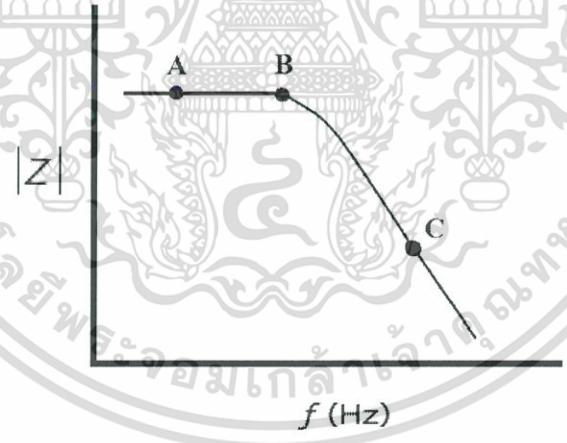
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$

- ที่ f ต่ำ (ที่บริเวณจุด A) Z' จะมีค่ามาก ส่วน $-Z''$ จะมีค่าน้อย
- ที่ f ของจุดสูงสุด (ที่บริเวณจุด B) Z' จะมีค่าลดลง ส่วน $-Z''$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นและในกรณีอุดมคติจะได้ว่า $Z' = -Z''$
- ที่ f สูงขึ้น (ที่บริเวณจุด C) ทั้ง Z' และ $-Z''$ จะมีค่าลดลงอีก

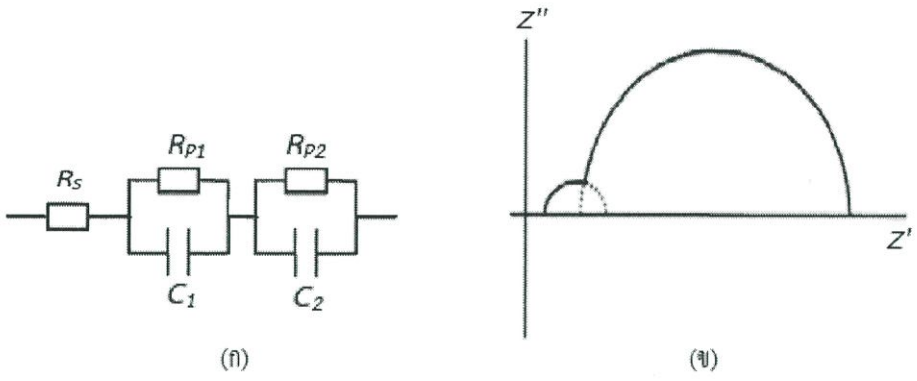
และถ้านำมาเขียนกราฟ $|Z|$ กับ f จะได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ f

แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model) [14] ต่ออนุกรมกันจะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.18 (ก) ส่วนสเปกตรัมของ Z ที่มีค่าคงตัวเวลา 2 ค่าจะแสดงใน รูปที่ 2.18 (ข) รูปครึ่งวงกลมใดเด่นกว่ากันก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ τ ทั้งสองนั้น ซึ่งมี τ ที่เด่นจะเห็นเป็นรูปครึ่งวงกลมอันเดียวอย่างชัดเจน ส่วนรูปครึ่งวงกลมอีกอันหนึ่งจะมองเห็น แต่บางครั้งจะปรากฏรูปครึ่งวงกลมที่บิดเบี้ยวยากที่แยกออกเป็นครึ่งวงกลมซ้อนกัน 2 วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 (ก) แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ข) กราฟของไนควิสต์

แบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะเป็นแบบจำลองชนิดที่ 3 ในการศึกษานี้ ซึ่งเป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร *RC* ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ตอบสนองต่อ f ปกติไปเป็น C ที่ขึ้นกับ f ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอิลีเมนต์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อ f ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นเกรนและขอบของเกรน เป็นต้น จุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมที่ถูกกดให้อยู่ต่ำกว่าแกน Z' ดังรูปที่ 2.19 (ข) จะมีการแจกแจงบริเวณค่าเฉลี่ย $\tau_{max} = \omega_{max}^{-1}$ ซึ่ง Z ของอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะแสดงในสมการ (2.43) ดังนี้คือ

$$Z(CPE) = \frac{1}{P(j\omega)^n} \tag{2.43}$$

อิลีเมนต์เฟสคงตัวไม่สามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของ R, C หรือ L ตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างเด่นชัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า n และ P ดังนั้นคือ

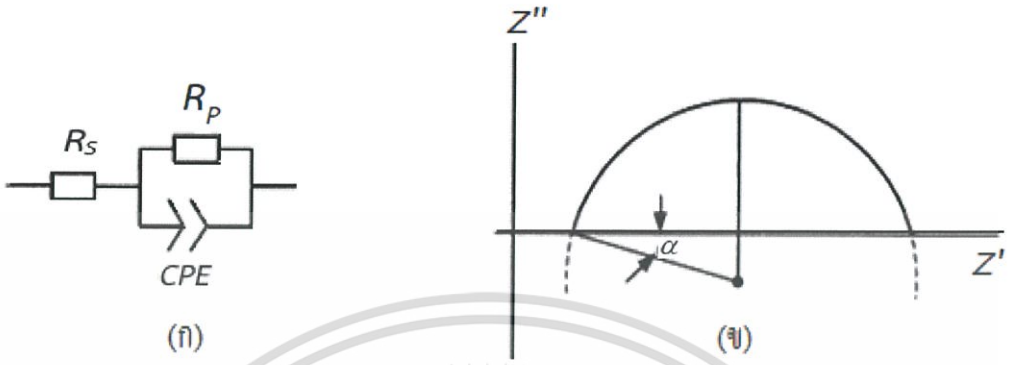
$$P = C^n (R_S^{-1} + R_P^{-1})^{1-n} \tag{2.44}$$

ถ้า $n = 1$ แล้ว Z (CPE) จะประพฤติเป็นตัวเก็บประจุในอุดมคติ แต่ถ้า $n = 0$ แล้ว Z (*CPE*) จะเท่ากับ $R_S^{-1} + R_P^{-1}$ ซึ่งถ้า n มีค่าแตกต่างไปจาก 1 มากๆ แสดงว่า C มีพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมาก ส่วนมุมกด (depression angle; α) จะแสดงดังความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{\pi}{2}(1-n) \tag{2.45}$$

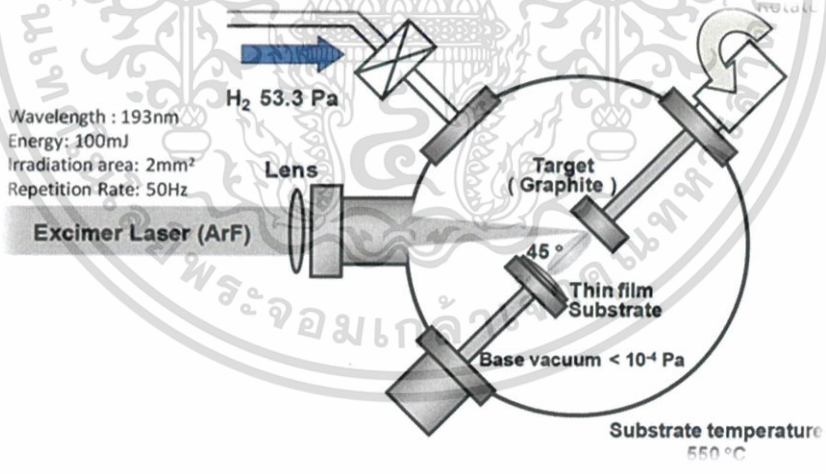
โดยที่ α มีหน่วยเป็นเรเดียน



รูปที่ 2.19 (ก) แสดงแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ข) กราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว

2.4 การเคลือบด้วยวิธี PLD [15]

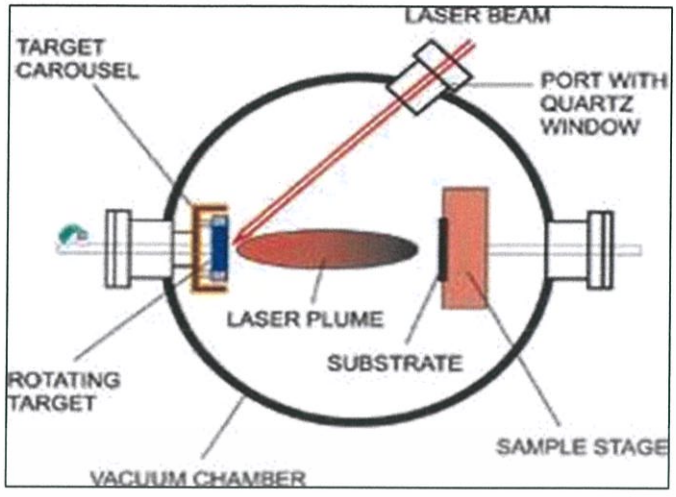
เลเซอร์ที่มีกำลังสูงจะถูกโฟกัสไปยังเป้า แต่ละเลเซอร์จะทำให้วัสดุที่ใช้เป็นเป้ากลายเป็นไอ และจะไปเคลือบเป็นฟิล์มที่แผ่นรองรับ



รูปที่ 2.20 รูปแสดงขั้นตอนการเคลือบด้วยวิธี PLD

เทคนิคของ PLD ถูกนำมาใช้เพื่อปลูกฟิล์มที่มีคุณภาพสูงมาเป็นเวลานานกว่าหนึ่งทศวรรษ แล้วเทคนิคนี้ใช้พัลส์เลเซอร์กำลังสูง (โดยทั่วไป ~ 10^8 Wcm^{-2}) เพื่อระเหยวัสดุจากพื้นผิวของเป้า เหตุการณ์ “ระเหย” ทำให้เกิดพลาสมาและมีการส่องสว่างอย่างรวดเร็วซึ่งจะขยายออกไปอย่างรวดเร็วจากพื้นผิวเป้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงหลักการ PLD ในการระเหยวัสดุออกจากผิวเป้า

วัสดุที่ระเหยซึ่งประกอบด้วยนิวตรอนอิออนอิเล็กตรอนเรียกว่า พลาสมา โดยพลาสมาที่ทำด้วยเลเซอร์และขยายออกไปจากพื้นผิวเป้า (ความเร็วปกติประมาณ 106 cms^{-1} ในสุญญากาศ)

ลักษณะเด่นของการเคลือบด้วยวิธีพัลส์เลเซอร์ คือ มีการเคลื่อนย้ายที่เป็นไปตามสัดส่วนทางเคมีของวัสดุที่ใช้เป็นเป้า, อนุภาคมีพลังงานสูง, การเคลือบในระบบที่สะอาด, ความเรียบง่ายในการออกแบบ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณ Takanori Hanada และคณะวิจัยได้ศึกษาฟิล์ม UNCD/a-C:H ชนิดพีที่มีการเจือ B 0.06% บนพื้นผิวของ Si ชนิดเอ็นโดยการเคลือบโดยวิธี PLD และได้ทำการประเมินผลของเฮทเทอร์โรจังค์ชันว่าโฟโตไดโอดในอัลตร้าไวโอเลตและมีการปรับปรุงแก้ไขเฮทเทอร์โรจังค์ชันโดยทำให้กระแสไฟฟ้ารั่วลดลง โดยการลดอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้ารั่วลดลงมากกว่า 3 เท่า ที่ 60 K เมื่อเทียบกับ 300 K แม้ว่าการตรวจจับคลื่นแสงที่มี f ค่าเดียว ที่มีขนาด 254 nm จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงกระแสไฟฟ้าส่องสว่างที่แรงดันย้อนกลับค่อยๆ ลดลงตามการลดกระแสไฟรั่ว

คุณ Habibe BAYHAN และคณะคณะวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอปเปอร์อินเดียม-แกลเลียม ไดซิลิไนด์ (CIGS) บนโซลาร์เซลล์ชนิดเฮเทโร แอตมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีถูกนำมาใช้ในการกำหนดลักษณะระดับกลุ่มและระดับอินเตอร์เฟซในชั้นตัวดูดซับทองแดง (อินเดียม แกลเลียม) การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการเก็บประจุและ f ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ระบุว่าถูกปล่อยออกมาจากตัวรับ เช่น ระดับข้อบกพร่องที่มีพลังงานกระตุ้นประมาณ 75 meV ข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบวงจรไฟฟ้าสมมูลของอุปกรณ์ได้รับการจัดเตรียมโดยการวิเคราะห์การตรวจวัดค่า Z ข้อมูล Z จะถูกนำเสนอในแผนภาพไนควิสต์ที่ระดับแรงดันไบอัส 300 K รูปแบบวงจรไฟฟ้าสมมูลประกอบด้วย R แบบขนานและ C ในชุดที่มี R ซึ่งจะทำให้ได้รับข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการดำเนินงาน เริ่มจากการจัดเตรียมตัวอย่างเฮทเทอร์โรจังค์ชันโฟโตไดโอดโดยใช้ฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่มีสารเจือสาร B และ N และ Si โดยวิธี PLD จากนั้นนำตัวอย่างชิ้นงานมาสร้างขั้วอิเล็กโทรด และนำตัวอย่างชิ้นงานมาทำการวัดค่าลักษณะความสัมพันธ์ *I-V* และวัดค่าลักษณะความสัมพันธ์ *Z-f* รวมไปถึงการอธิบายวิธีการค่า *I-V* และ *Z-f*

3.1 การจัดเตรียมตัวอย่างเฮทเทอร์โรจังค์ชันโฟโตไดโอด

3.1.1 การจัดทำพี-เอ็นเฮทเทอร์โรจังค์ชันโฟโตไดโอด

ฟิล์มบาง UNCD/a-C:H ที่เจือด้วย B และ N ได้ถูกเตรียมขึ้นมาด้วยวิธีการเคลือบแบบ PLD ดังแสดงเงื่อนไขในตารางที่ 3.1

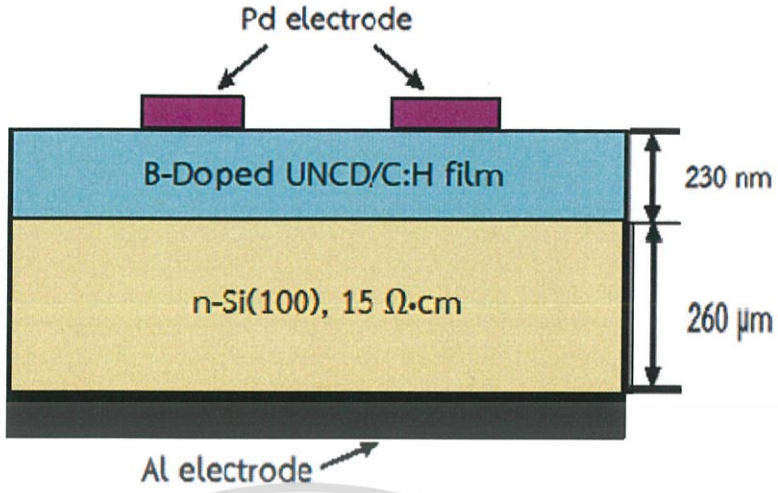
ตาราง 3.1 แสดงเงื่อนไขของการสร้างพี-เอ็นเฮทเทอร์โรจังค์ชัน

วัสดุ	เงื่อนไข
เป้า	แกร์ไฟต์ที่ถูกเจือด้วย B และ N
แหล่งกำเนิดเลเซอร์	เลเซอร์ ArF
ฐานรอง	Si(100) 1-5 Ω•cm
อุณหภูมิที่พื้นผิว	550 °C
ความหนาของพื้นผิว	260 μm
ระยะห่างระหว่างเป้ากับวัสดุ	15 mm
ความดันบรรยากาศ	น้อยกว่า 10^{-4} Pa
ความคล่องแคล่วและอัตราการเกิดซ้ำของพัลส์เลเซอร์	100 mJ และ 50 Hz
ความหนาของฟิล์ม	230 nm

3.1.2 การจัดทำขั้วอิเล็กโทรด

เมื่อจัดทำพี-เอ็นเฮทเทอร์โรจังค์ชันเรียบร้อยแล้วเราจะนำสารตัวอย่างมาจัดทำขั้วอิเล็กโทรดโดยการนำขั้ว Pd มาเคลือบติดกับชนิดพีของ UNCD/a-C:H ฟิล์ม และนำขั้ว Al มาเคลือบติดกับชนิดเอ็นของสารกึ่งตัวนำ Si ด้วยวิธีสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพตัวอย่างพี-เอ็นเฮทเทอร์โรจังค์ชันโฟโตไดโอดของ UNCD/a-C:H กับ Si ที่มีการเจือสาร B 0.1 %

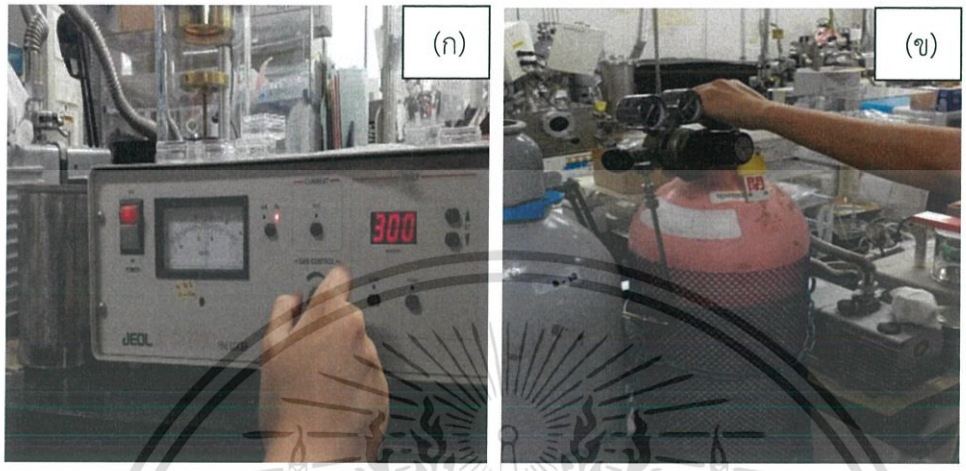
การทำขั้วอิเล็กโทรดให้กับฟิล์มบางหรือบนพื้นผิว Si สามารถทำได้ด้วยวิธีการสปัตเตอริง ขั้นแรกให้วางฟิล์มบางไว้บนแท่นวางตัวอย่างของเครื่องสปัตเตอริงดังรูปที่ 3.2 (ก) จากนั้นให้ใช้น็อตหรือสิ่งของที่มีน้ำหนักพอสมควรเพื่อมากดทับบนชิ้นงานไม่ให้ชิ้นงานมีการขยับหรือเคลื่อนไหวในระหว่างกระบวนการสปัตเตอริง จากนั้นให้เลือกแผ่นเป้าที่จะนำมาสร้างขั้นอิเล็กโทรดในการทดลองได้ใช้แผ่นเป้า Pd ดังรูปที่ 3.2 (ข) เป็นแผ่นเป้าจากนั้นนำแผ่นเป้าไปติดกับฝาของเครื่องสปัตเตอริงและปิดล็อคฝาของเครื่องสปัตเตอริง

รูปที่ 3.2 (ก) การวางตัวอย่างในเครื่องสปัตเตอริง และ (ข) แผ่นเป้า Pd

ในกระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดบนฟิล์มบางเราจะทำการสร้างสองรอบโดยรอบแรกจะทำการสร้างขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้เป้า Pd เคลือบลงบนด้านฟิล์ม UNCD โดยเคลือบเป็นลักษณะจุด ส่วนอีกด้านหนึ่งคือด้านของ Si จะเคลือบด้วย Al เมื่อปิดฝาแล้วเปิดกลโรตารี่ปั๊มเพื่อให้ลดความดันอากาศในภาชนะโดยเราต้องปรับให้ความดันอากาศต่ำกว่า 8 Pa โดยใช้ปุ่มควบคุมปริมาณความดันดังรูปที่

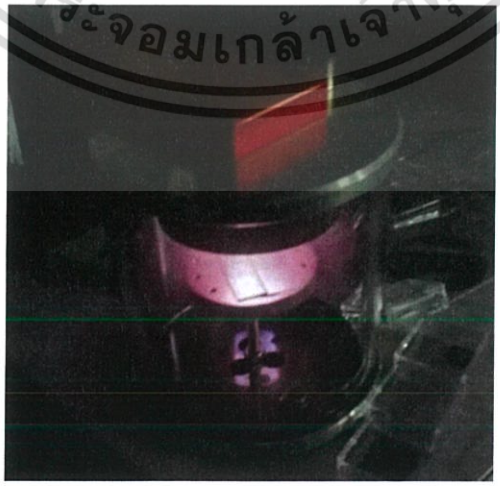
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 (ก) หลังจากนั้นจึงเปิดวาล์วให้แก๊สอาร์กอนไหลเข้าไปในภาชนะ ดังรูปที่ 3.3 (ข) หมุนปุ่มควบคุมแก๊สจนความดันอากาศขึ้นเป็น 40 Pa รอประมาณ 20 s เพื่อให้แก๊สอาร์กอนไหลเข้ามา จากนั้นลดความดันอากาศไปที่ 10 Pa เพื่อให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนคงที่ แล้วกดปุ่ม start จะเริ่มทำการสปัตเตอริง โดยจะทำการสปัตเตอริงเป็นเวลา 300 s



รูปที่ 3.3 (ก) ปุ่มควบคุมปริมาณความดัน (ข) เปิด/ปิดแก๊สอาร์กอน

จากรูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยแก๊สอาร์กอนจะแตกตัวและไอออนของแก๊สอาร์กอนแตกตัวและพุ่งเข้าชนกับผิวเป้า Pd จากนั้นอะตอมของแผ่นเป้าจะหลุดออกมาเคลือบเป็นฟิล์มบางโดยเราสามารถควบคุมปริมาณความดันของแก๊สอาร์กอนได้ตามต้องการดังรูปที่ 3.4 โดยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางต้องทำในภาชนะสูญญากาศซึ่งเราจะใช้ปั๊มกลโรตารีในการลดความดันภายในภาชนะที่ทำการเคลือบ ยิ่งเราสามารถปรับความดันบรรยากาศให้เข้าใกล้สูญญากาศมากเท่าใดกระบวนการเคลือบก็จะยิ่งดีมากขึ้น ขณะเครื่องทำการสปัตเตอริงเราจะสามารถมองเห็นพลาสมาเป็นแสงสีม่วงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดด้วย Pd

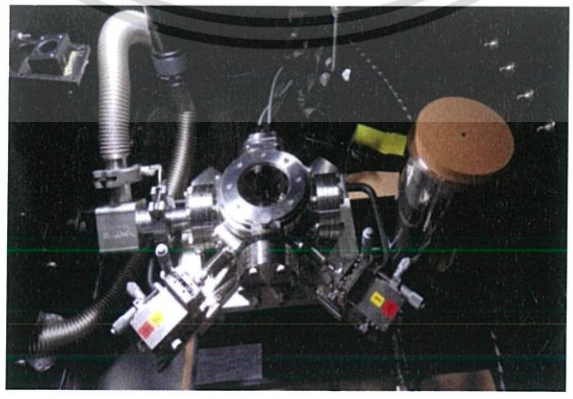
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสปัตเตอริงหนึ่งครั้งจะใช้เวลา 300 s โดยแผ่นเป้าแต่ละชนิดจะได้ความหนาของขั้วอิเล็กโทรดไม่เท่ากันโดยเป้า Pd จะได้ความหนาอยู่ที่ 35 nm ซึ่งหากเราทำการสร้างขั้วอิเล็กโทรดเป็นเวลา 300 s แล้ว ได้ระดับความหนาที่บางเกินไป เราสามารถทำการเพิ่มระยะเวลาในการสปัตเตอริงเพื่อเป็นการเพิ่มขนาดความหนาของขั้วอิเล็กโทรด เช่นเดียวกันหากต้องการขั้วอิเล็กโทรดที่มีความหนาที่น้อยกว่าที่ทำได้ใน 300 s เราสามารถปรับเวลาการสร้างขั้วอิเล็กโทรดให้น้อยลงตามต้องการได้

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการสร้างขั้วอิเล็กโทรด

3.2 การวัดค่าลักษณะความสัมพันธ์ของ *I-V* และ *Z-f*

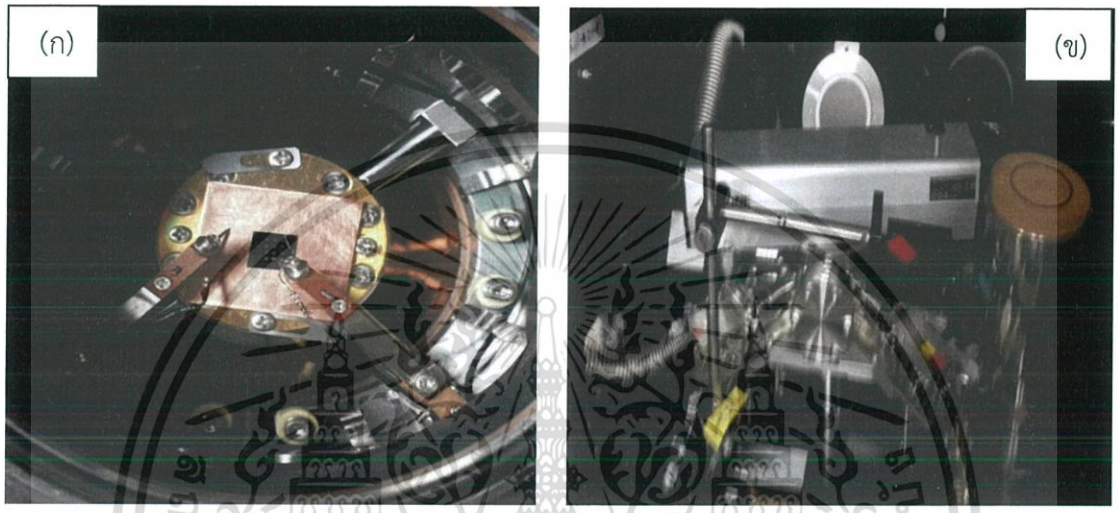
จากรูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างของภาชนะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่างที่ใช้ทำการวัดค่าความสัมพันธ์ *I-V* และ *Z-f* ภายในภาชนะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่างจะมีโพรบที่มีลักษณะเป็นเข็มเล็กแหลมมีหน้าที่เอาไว้สัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรด โดยเครื่องวัดสามารถปิดฝาเพื่อกันไม่ให้แสงจากภายนอกเข้าไปได้ซึ่งเป็นการทำการทดลองในที่มืด



รูปที่ 3.6 ภาชนะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 (ก) การนำชิ้นงานไปวางบนแผ่นรองที่โพรบด้านในมีแกนที่สามารถปรับได้สามทิศทางซึ่งมีโพรบแหลมอยู่ตรงปลาย ให้นำโพรบด้านที่เป็นบวกสัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นจุดกลมๆ ขนาดเล็ก ในการนำโพรบไปแตะกับชิ้นงานควรระวังไม่ให้โพรบแตะกับชิ้นงานแรงเกินไป เพราะอาจทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ และจากรูปที่ 3.7 (ข) เป็นการจัดวางแหล่งกำเนิดแสงในย่านตามองเห็น (Ultraviolet; UV) โดยให้แสงสัมผัสกับชิ้นงานเพื่อศึกษาการตอบสนองของแสงต่อเฮทเทอร์โรจังค์ชันและเปรียบเทียบลักษณะการนำไฟฟ้าของเฮทเทอร์โรจังค์ชันในที่มืดและที่ฉายแสง



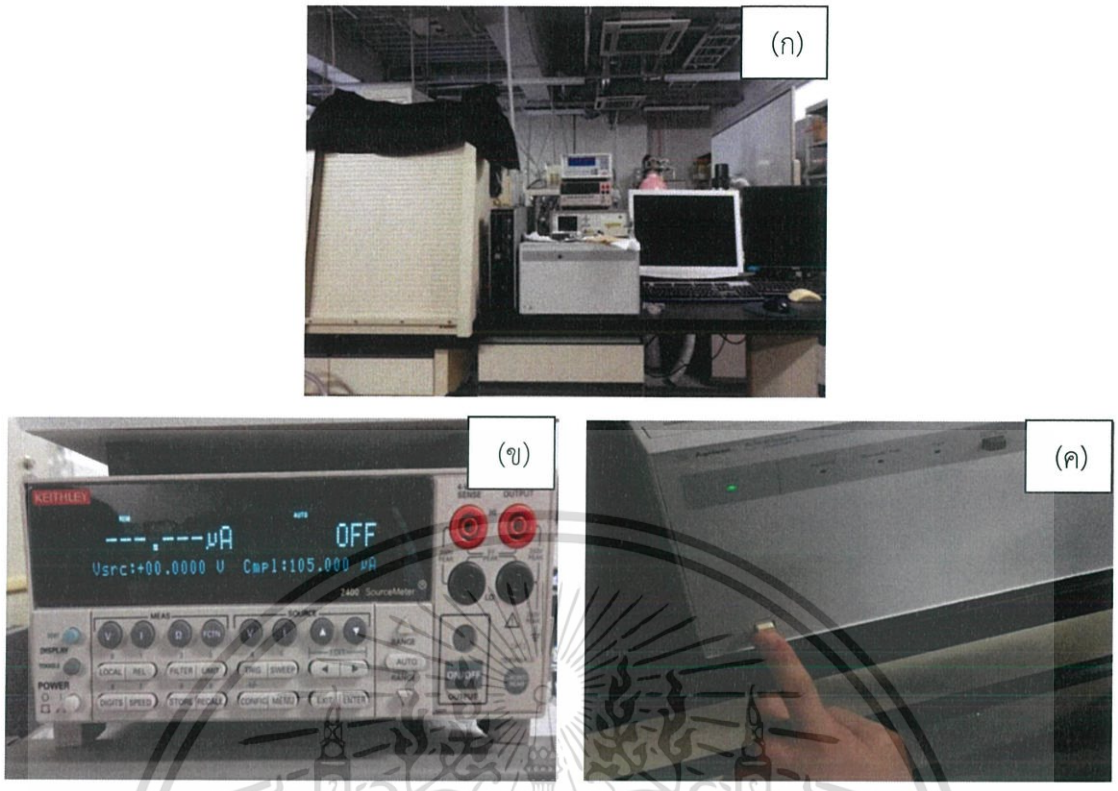
รูปที่ 3.7 (ก) ระบบวางชิ้นงานที่มีโพรบด้านใน (ข) การจัดวางแสง UV เพื่อศึกษาการตอบสนองของแสงต่อเฮทเทอร์โรจังค์ชัน

3.2.1 การวัดลักษณะความสัมพันธ์ *I-V*

ลักษณะความสัมพันธ์ของ *I* เทียบกับ *V* หรือ วัดได้โดยใช้เครื่อง Keithley 2400 ร่วมกับเครื่อง E4980A ที่ถูกควบคุมโดยซอฟต์แวร์ โดยเครื่องวัดค่า *I-V* และ *Z-f* จะประกอบไปด้วยระบบวางชิ้นงานที่มีโพรบด้านในโดยจะสามารถปิดฝาครอบเพื่อไม่ให้แสงเข้าไปในการวัดชิ้นงานในที่มืด เครื่อง Keithley 2400 สำหรับการวัดลักษณะความสัมพันธ์ *I-V* เครื่อง UPS ใช้สำหรับเป็นไฟสำรองป้องกันการเกิดไฟดับการทดลองจะได้ไม่เกิดปัญหาและคอมพิวเตอร์ที่ลงโปรแกรม I-V and C-V เพื่อใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง *I-V* รวมไปถึงลักษณะความสัมพันธ์ของ *C-V*

จากรูปที่ 3.8 (ก) และรูปที่ 3.8 (ข) ในการวัดจะใช้เครื่องวัด Keithley 2400 ร่วมกับเครื่อง E4980A ที่ถูกควบคุมโดยซอฟต์แวร์ เราจำเป็นต้องเปิดเพาเวอร์ซัพพลาย (เครื่อง Agilent E5250A) ก่อนทุกครั้งเพื่อเป็นการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับตัวเครื่องมือวัดทั้งสองตัวดังรูปที่ 3.8 (ค) หากลืมเปิดเพาเวอร์ซัพพลายระหว่างทำการทดลองเครื่องอาจมีปัญหาไฟตกและดับได้เนื่องจากมีไฟเลี้ยงไม่พอ ดังนั้น ควรตรวจเช็คให้แน่ใจก่อนทำการใช้เครื่องเพื่อเป็นการดูแลรักษาเครื่องมือในการทำการทดลองและไม่ส่งผลกระทบต่อการทดลองเพราะอาจทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



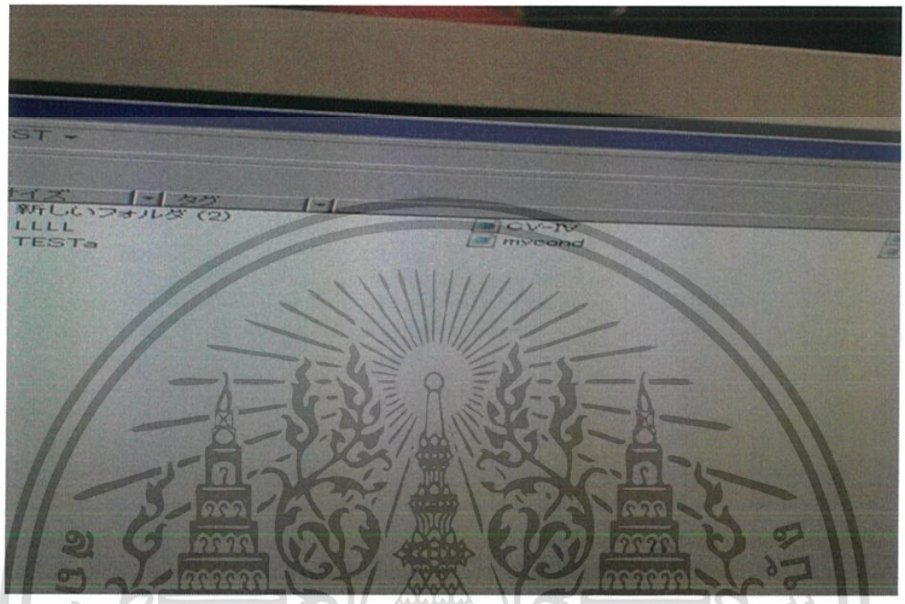
รูปที่ 3.8 (ก) เครื่องวัดค่า *I-V* และ *Z-f* (ข) เครื่อง Keithley 2400 สำหรับการวัดลักษณะความสัมพันธ์ *I-V* (ค) แสดงขั้นตอนการเปิดเครื่อง Agilent E5250A

จากรูป 3.9 เริ่มต้นขั้นตอนแรกต้องทำการเปิดคอมพิวเตอร์ที่ผ่านการลงโปรแกรม I-V and C-V เพื่อที่จะใช้โปรแกรมในการช่วยวัดค่าต่างๆ ที่เราต้องการ เช่น ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *I-V* รวมไปถึงลักษณะความสัมพันธ์ของ *C-V*

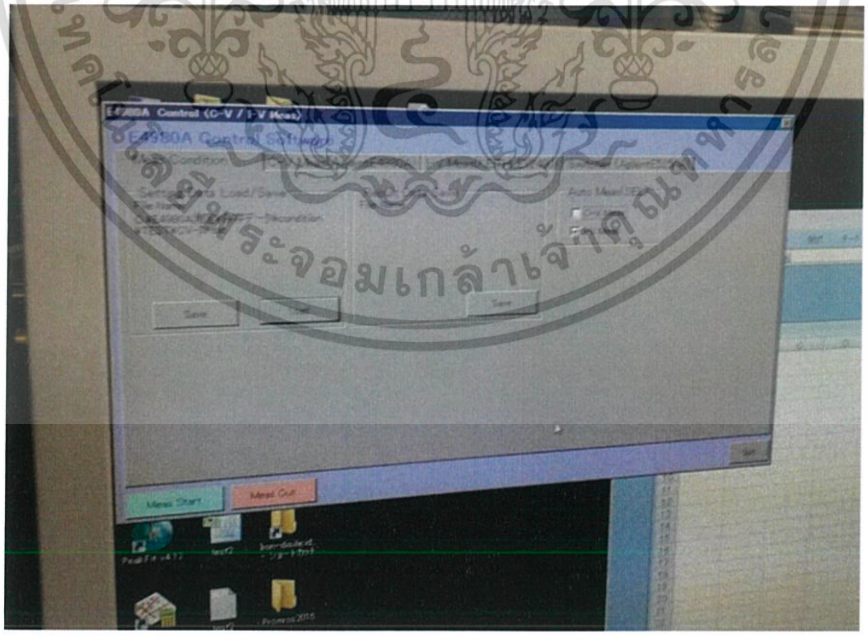
รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการเปิดคอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานโปรแกรม I-V and C-V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 และ รูปที่ 3.11 เมื่อกดเข้าไปที่โปรแกรม *I-V* และ *C-V* ที่อยู่บนหน้าจอแสดงผลจะแสดงหน้าต่างโปรแกรมให้เราทำการเลือกโหมดการวัดในโหมด *CV - IV* โดยการกดดับเบิลคลิกที่โหมด เพื่อที่จะวัดลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *I–V* จากนั้นหน้าต่างโปรแกรมจะกลับมาที่หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม *I-V* และ *C-V* และให้ทำการคลิกที่โหมดการวัด *C-V* meas ออกเนื่องจากในการทดลองเราจะทำการวัดแค่ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *I –V*



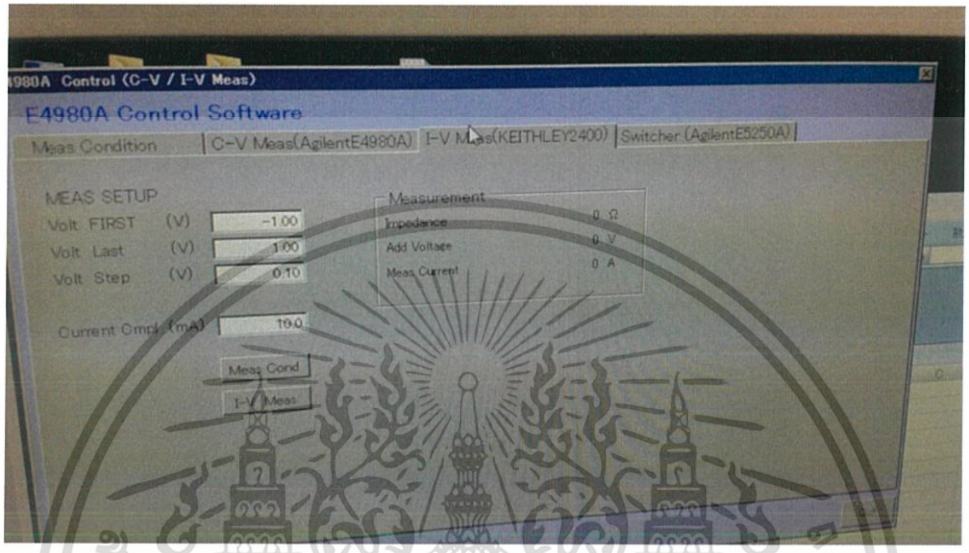
รูปที่ 3.10 แสดงโฟล์เดอร์ตัวเลือกโหมดการวัด



รูปที่ 3.11 แสดงโหมดการวัด *CV - IV*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.12 ให้คลิกที่โหมดการตั้งค่า “I-V Meas (AgilentE4980A)” เพื่อที่จะทำการกำหนดค่า *V* เริ่มต้นและค่า *V* สุดท้ายที่จะทำการวัด เริ่มต้นควรจะกำหนดค่าในช่วงสั้นๆ เช่น -1.00 V – 1.00 V และเราสามารถทำการวัดแบบละเอียดได้โดยการปรับระยะห่างของ *V* โดยปรับที่โหมด “Volt Step” เช่นปรับความละเอียดเป็นค่าละ 0.10 V เมื่อกำหนดค่าการวัดเรียบร้อยแล้วให้คลิกที่ปุ่ม “*I-V* Meas” จากนั้นหน้าต่างโปรแกรมจะกลับมาที่หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม *I-V* และ *C-V*



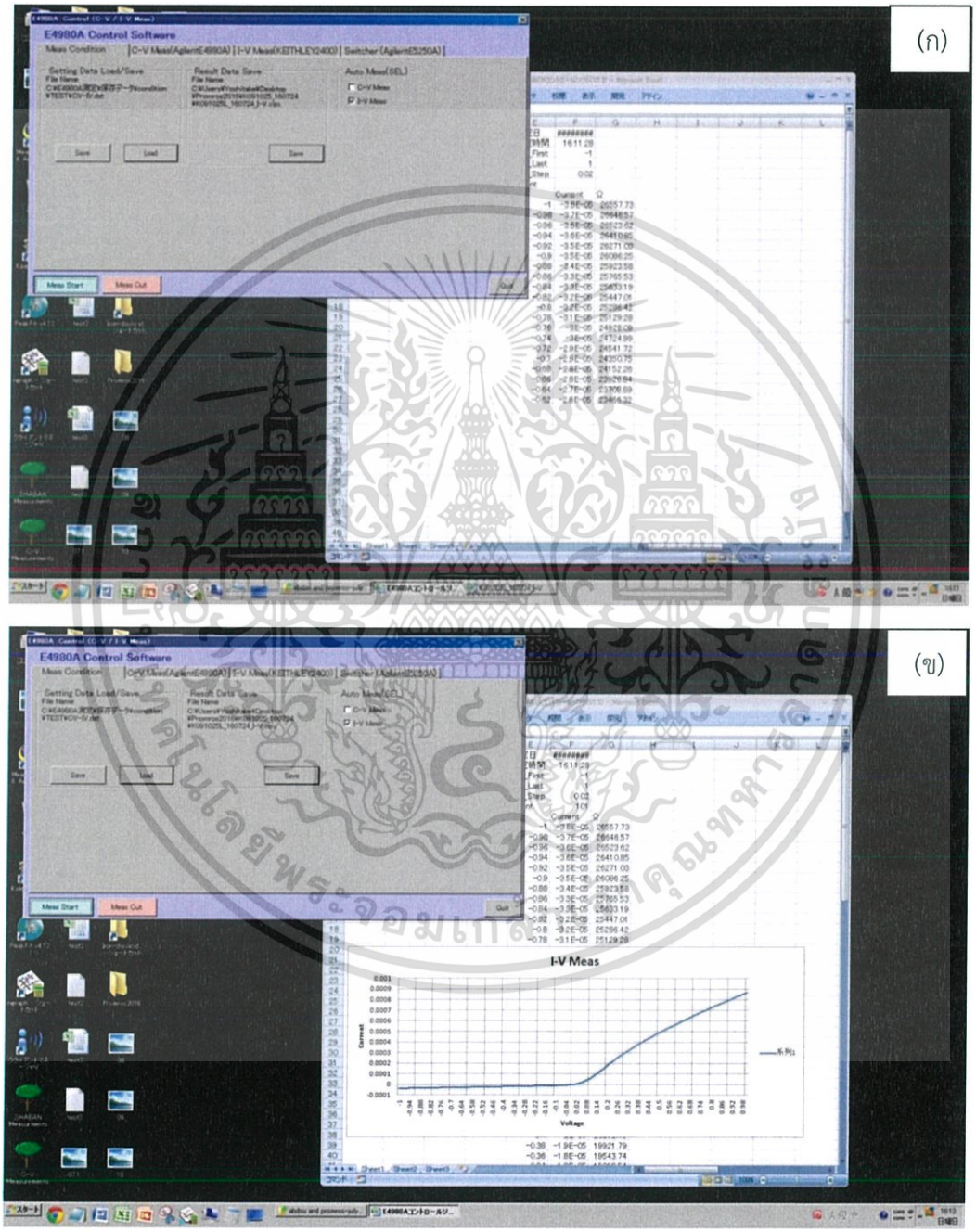
รูปที่ 3.12 แสดงการตั้งค่าช่วง *V* ที่จะทำการวัด

จากรูปที่ 3.13 ให้เรากดที่ปุ่ม “Save” เพื่อทำการบันทึกค่าการวัดและตั้งชื่อไฟล์งานตามที่เราต้องการและกดปุ่ม “OK” จากนั้นหน้าต่างโปรแกรมจะกลับมาที่หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม *I-V* และ *C-V* ให้เราทำการกดปุ่ม "Meas Start" โปรแกรมจะเริ่มทำการวัดค่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *I-V*

รูปที่ 3.13 แสดงขั้นตอนบันทึกค่าไฟล์งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 ค่าที่ได้จากการวัดจะเริ่มรันตั้งแต่ *V* เริ่มต้นที่เรากำหนดคือ - 1.0 V ไปจนถึงโวลต์สุดท้าย คือ 1.0 V โดยระยะห่างของ *V* ขึ้นอยู่กับความละเอียดที่เรากำหนด และจากรูปที่ 3.14 (ข) แสดงตัวอย่างของกราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *I* และ *V* ที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งเราสามารถทำการกดปุ่ม “Save” เพื่อบันทึกค่าที่ได้จากการวัดซึ่งไฟล์ที่ได้จะถูกบันทึกไว้ในรูปแบบของไฟล์ Excel



รูปที่ 3.14 (ก) ขั้นตอนการวัดค่าความสัมพันธ์ *I-V* (ข) แสดงค่าที่วัดได้และกราฟของความสัมพันธ์ *I-V*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

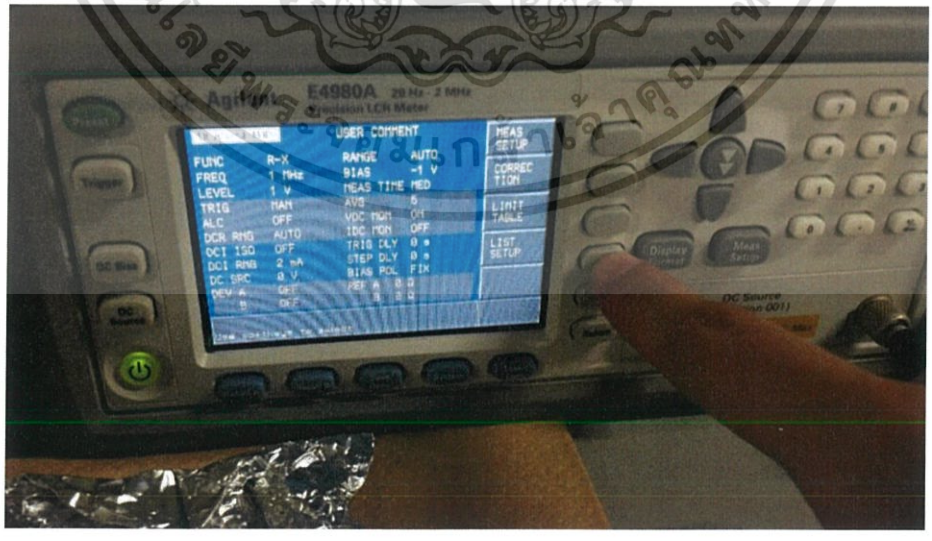
3.2.2 การวัดลักษณะความสัมพันธ์ *Z-f*

ในการวัดค่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *Z-f* วัดโดยใช้เครื่อง Agilent E4980A เมื่อได้ลักษณะความสัมพันธ์ของ *I-V*

จากรูปที่ 3.15 แสดงขั้นตอนการวัดค่าลักษณะความสัมพันธ์ของ *I-V* เมื่อได้ลักษณะความสัมพันธ์ของ *I-V* ให้ทำการกดปุ่ม “Meas Setup” เพื่อเข้าสู่โหมดการวัดค่า *R-X* โดยใช้เครื่องวัด LCR (รุ่น Agilent E4980A)

รูปที่ 3.15 การวัดลักษณะความสัมพันธ์ *R-X*

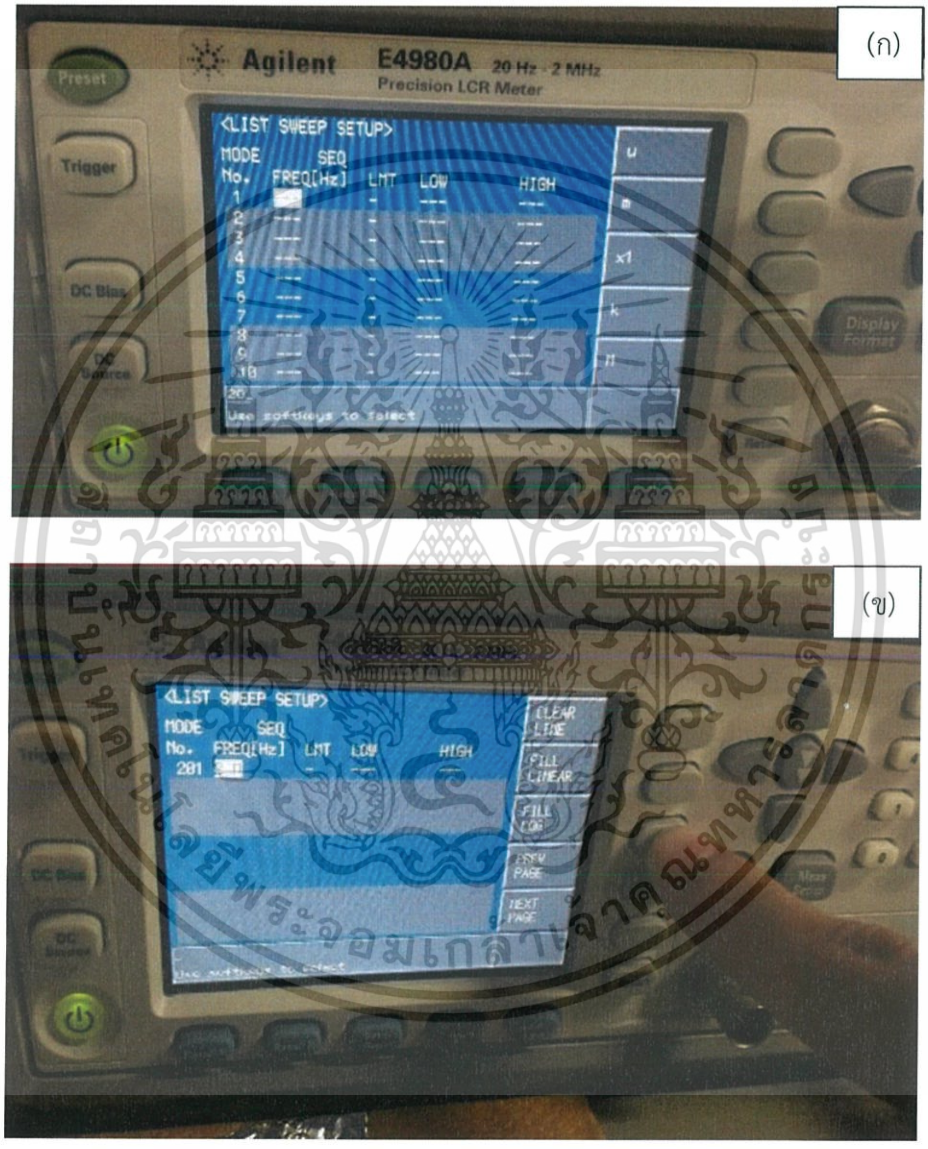
จากรูป 3.16 ได้ทำการตั้งค่าเพื่อ วัดค่า *R-X* กำหนดค่า “BIAS” ตามช่วงที่ต้องการวัดในที่นี้คือช่วง -3.0 V ถึง 3.0 V และตั้งค่า “IDC MOM” เป็น “OFF” และตั้งค่า “BIAS POL” เป็น “AUTO” เสร็จสิ้นการตั้งค่าแล้ว จากนั้นกดปุ่ม “LIST SETUP”



รูปที่ 3.16 การตั้งค่าการวัดโหมด *R-X*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

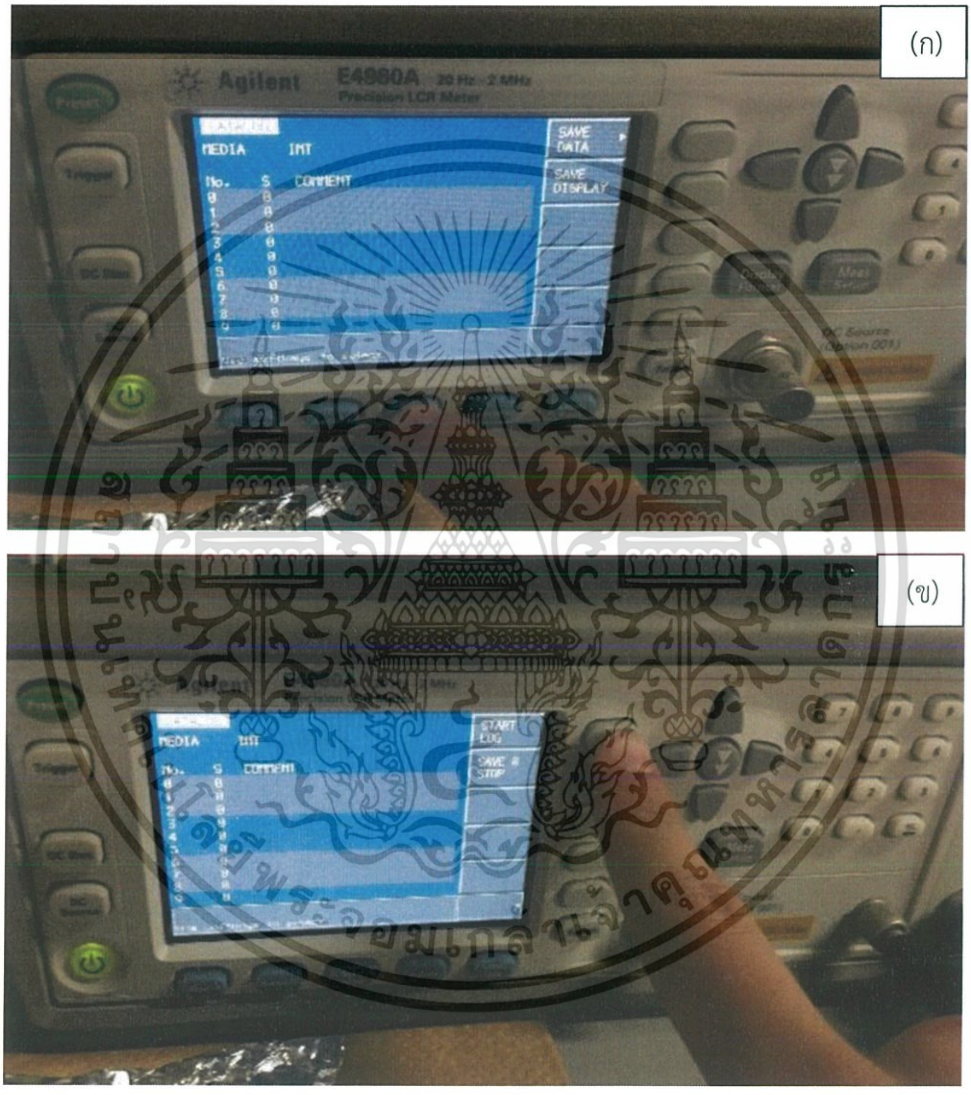
จากรูปที่ 3.17 (ก) แสดงการตั้งค่า f เริ่มต้นโดยจะทำการวัดค่าโดยให้เริ่มตั้งค่า f เริ่มต้นที่ 20 Hz เป็นค่าแรก และกดไปที่ปุ่ม “PREV PAGE” เพื่อไปตั้งค่า f ค่าสุดท้ายที่ 2 MHz ดังรูปที่ 3.17 (ข) ควรตรวจเช็คค่า f ที่เลือกให้ถูกต้องทั้งค่า f เริ่มต้นและค่า f สุดท้ายว่าเป็นค่าที่ต้องการจากนั้นกดปุ่ม “FILL LOG”



รูปที่ 3.17 (ก) ตั้งค่า f เริ่มต้น (ข) ตั้งค่า f ค่าสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

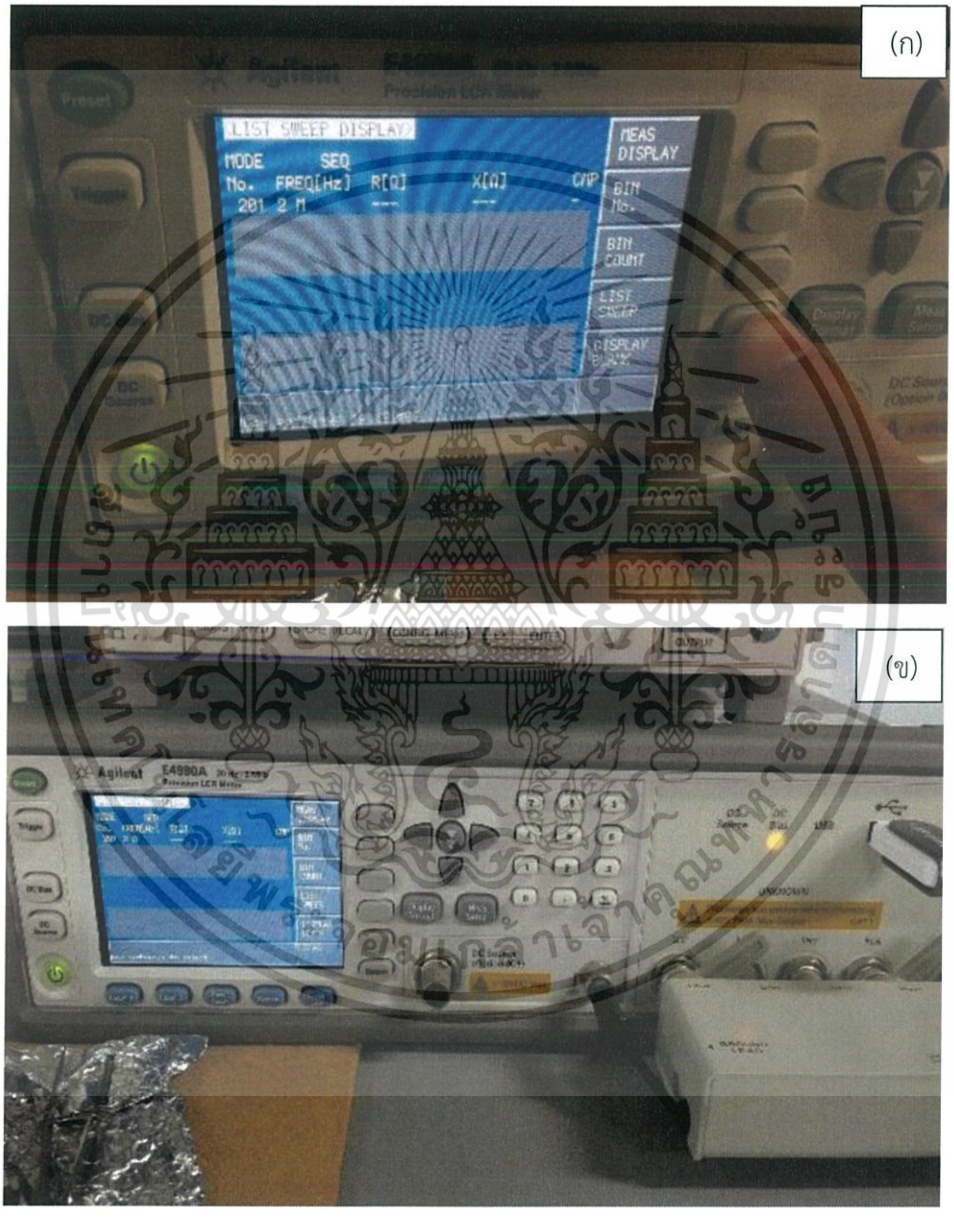
จากรูปที่ 3.18 (ก) กดปุ่ม “Save/Recall” เพื่อบันทึกข้อมูลที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ทั้งหมด จากนั้นกดปุ่ม “START LOG” เพื่อให้เครื่องเตรียมความพร้อมก่อนที่จะทำการวัดข้อมูลดังรูปที่ 3.18 (ข) โดยที่ขณะทำการวัดเครื่องจะทำการรันค่าไปเองจาก 20 Hz จนถึง 2 MHz ซึ่งเราไม่ต้องทำการปรับแต่อย่างใด แต่ในการทดลองต้องควรระวังอย่างมากเนื่องจากไม่สามารถกดหยุดเพื่อดูค่าการทดลองได้ต้องรอจนกว่าจะรันจนครบตามจำนวน f ที่กำหนดแล้วเครื่องจะหยุดที่ค่า f สุดท้าย



รูปที่ 3.18 (ก) แสดงการบันทึกค่าที่ตั้งค่าไว้ (ข) คำสั่งเตรียมพร้อมที่จะทำการวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

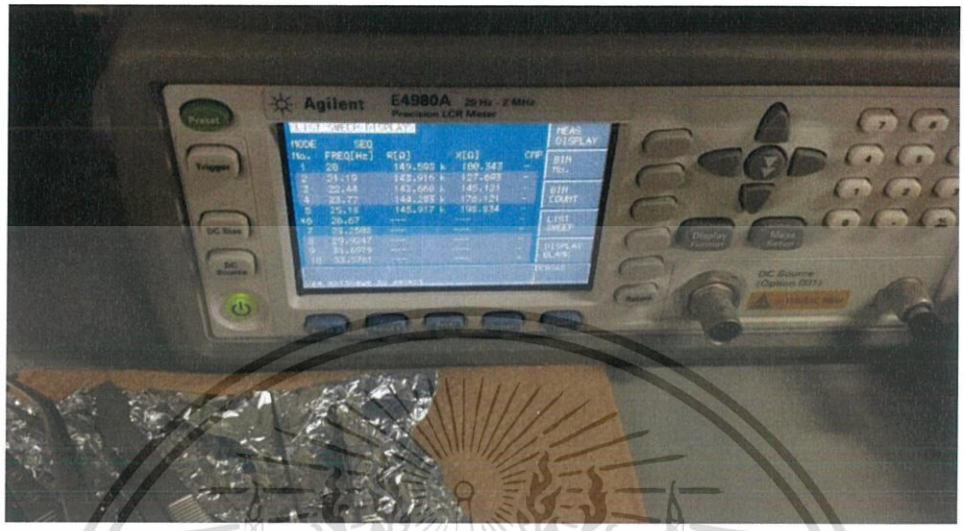
จากรูปที่ 3.19 (ก) กดปุ่ม “LIST SWEEP”เพื่อทำการตรวจเช็คความถูกต้องในการตั้งค่าทั้งหมดที่จะทำการวัดมอนิเตอร์จะแสดงผลหน้าการตั้งค่า f สุดท้ายจากนั้นในรูป 3.19 (ข) ให้ทำการเสียบแฟรชไดรฟ์เพื่อที่จะเก็บข้อมูลผลที่ได้จากการวัด และกดปุ่ม “DC Bias” เพื่อที่จะทำการวัดข้อมูลในโหมดการวัดไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นกดปุ่ม “Triger” เครื่องจะแสดงค่า R-X ที่ได้จากการวัดโดยแสดงค่าทีละค่าเริ่มจากค่า f เริ่มต้นและไปจบที่ค่า f สุดท้ายตามที่เราได้กำหนดและตั้งค่าไว้ในขั้นต้น



รูปที่ 3.19 (ก) ตรวจเช็คความถูกต้องในการตั้งค่า (ข) เสียบ Flash drive และกดปุ่ม “DC Bias” เพื่อวัดโหมด DC

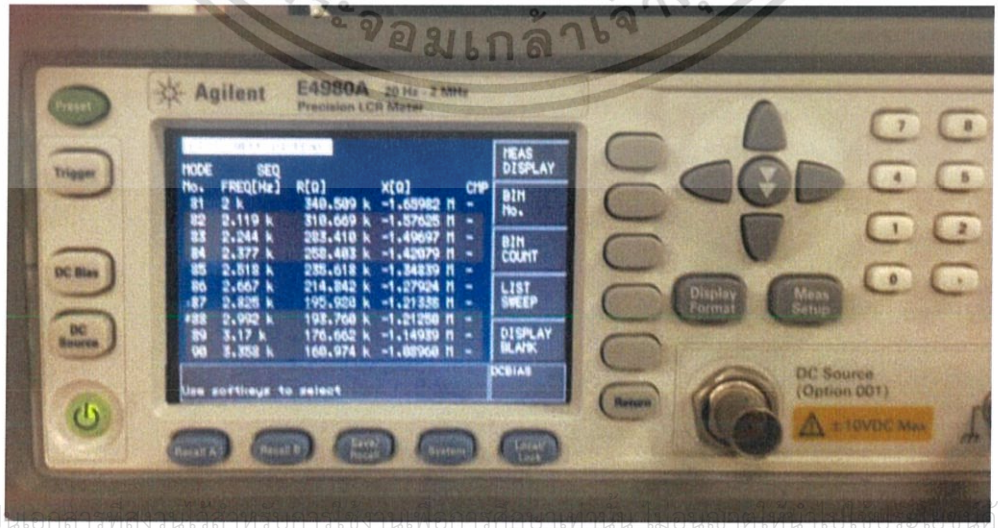
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.20 แสดงภาพการทำงานของเครื่อง RCL มิเตอร์ ในขณะที่เครื่องทำการวัดค่า *R-X* โดยเริ่มจากค่าที่หนึ่งคือค่า f เริ่มต้นที่ 20 Hz ไปจนถึงค่า f สุดท้ายที่ 2 MHz ตามลำดับ รวมทั้งหมด 201 ค่า



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องระหว่างทำการวัด

จากรูปที่ 3.21 การวัดค่า *R-X* เสร็จสิ้น เครื่องจะแสดงค่าที่ได้จากการวัด ให้กดปุ่ม "Save/Recell" จากนั้นกดปุ่ม "Save Stop" เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการวัดในครั้งนี้ลงในแฟรชไดรฟ์ซึ่งไฟล์งานที่บันทึกจะบันทึกในรูปแบบของไฟล์ Excel โดยในการทดลองครั้งนี้เราได้ทำการทดลองหาลักษณะความสัมพันธ์ของเฮทเทอร์โรจังชันซึ่งประกอบด้วยผลึกขนาดอัลตร้านาโน/อะมอฟัสคาร์บอนที่มีการเติมไฮโดรเจนและซิลิกอนชนิดเอ็นโดยชนิดพีการเจือ B ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.1%, 5% และ 20% และหาลักษณะความสัมพันธ์ของฟิล์ม UNCD/a-C:H ที่มีการเติม N 3% เพื่อดูความแตกต่างของเฮทเทอร์โรจังค์ชันแต่ละตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.21 แสดงตัวอย่างค่า *R-X* ที่ได้จากการวัด

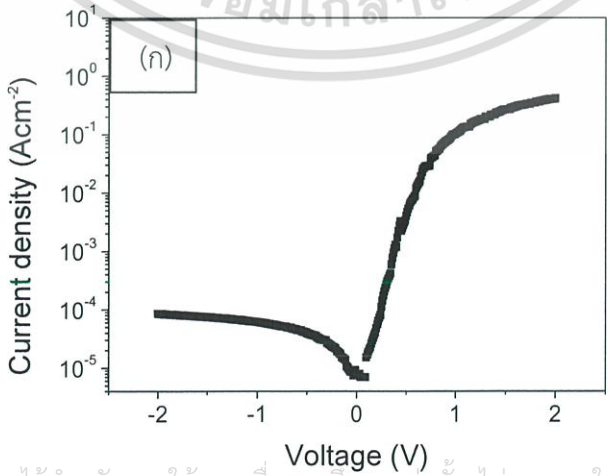
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

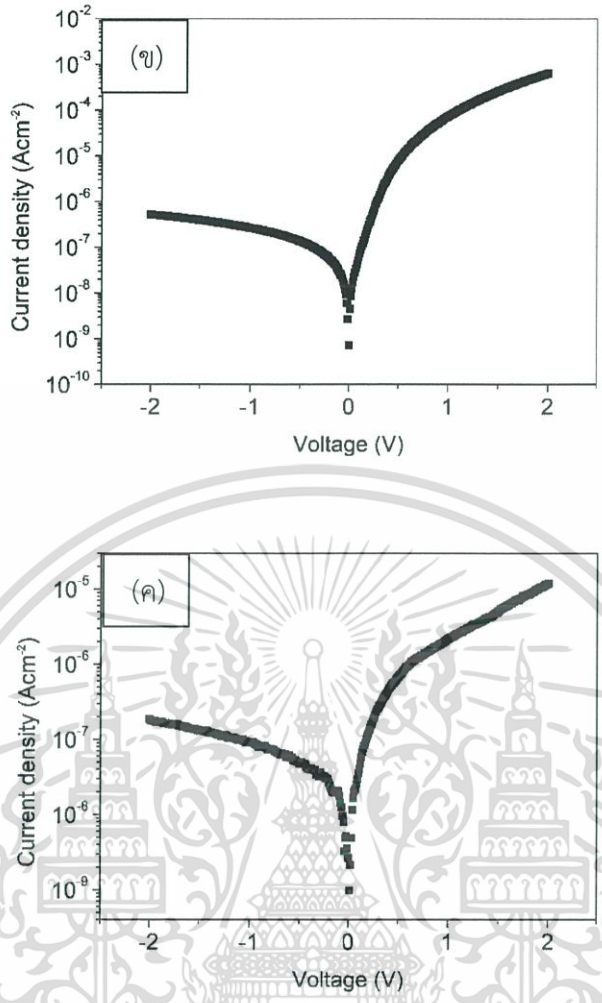
ในงานวิจัยนี้ผลของการทดลองหาลักษณะความสัมพันธ์ของเฮทเทอร์โรจังชันซึ่งประกอบด้วย UNCD/a-C:H และ Si ชนิดเอ็นโดยชนิดพีการเจือสาร B ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.1%, 5% และ 20% และหาลักษณะความสัมพันธ์ของ UNCD/a-C:H ชนิดเอ็นที่มีการเติมสาร N 3% และ Si ชนิดพีซึ่งจะนำมาสร้างลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z''- Z', $Z''-f$ และ $Z''-f$ จากนั้น เปรียบเทียบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างการวัดในที่มืดกับการวัดในที่ฉายแสงรวมถึงนำลักษณะความสัมพันธ์ของเฮทเทอร์โรจังชันมาสร้างวงจรสมมูล

4.1 การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ *I - V*, $Z'-f$, $Z''-f$ และ Z''- Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B ในปริมาณที่ต่างกันในที่มืด

จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ *I-V* ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือสาร B ในปริมาณที่ต่างกันคือ (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% และศึกษาในที่มืดเพื่อเป็นการยืนยันว่าเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่นำมาทำการทดลองมีคุณสมบัติเป็นไดโอด ซึ่งจากรูปที่ 4.1 จะสังเกตได้ว่าทุกลักษณะความสัมพันธ์ของเฮทเทอโรจังค์ชันมีคุณสมบัติความเป็นไดโอด เฮทเทอร์จังค์ชันทั้งหมดที่ไบอัสย้อนกลับมีกระแสน้อยกว่าฝั่งไบอัสตรงและเฮทเทอโรจังค์ชันที่มีการเจือ B 0.1% มีกระแสรั่วไหลฝั่งไบอัสย้อนกลับน้อยที่สุด และกระแสรั่วไหลฝั่งไบอัสย้อนกลับจะเพิ่มมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของ B ที่มีการเจือเข้าไปในเฮทเทอร์โรจังค์ชัน



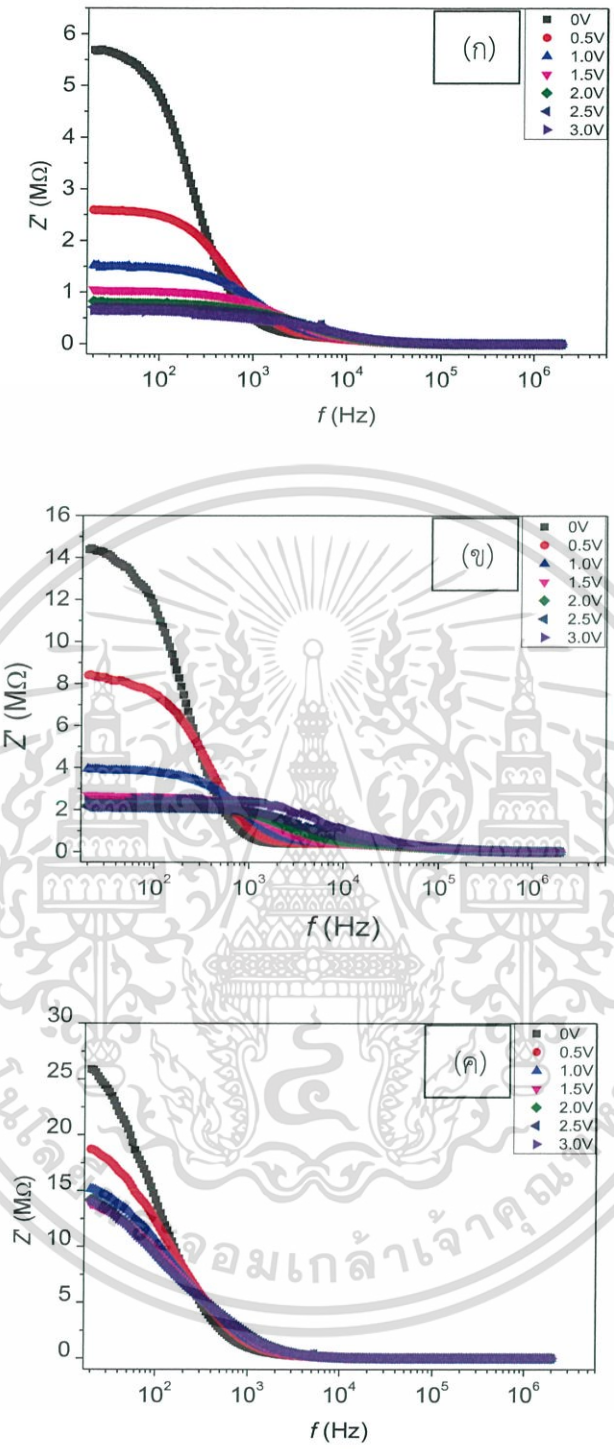
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *I-V* ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือสาร B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่มืด

จากรูปที่ 4.2 ค่า *V* ที่ทำให้ค่า Z' มีค่าสูงที่สุดคือ 0 V และค่า Z' ที่สูงที่สุดจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเพิ่มค่า *V* จะเห็นว่ารูปที่ 4.2 (ก) ที่ f เริ่มต้นค่าของ Z' ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 5.5 MΩ รูปที่ 4.2 (ข) ที่ f เริ่มต้นค่าของ Z' ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 15 – 25 MΩ และ รูปที่ 4.2 (ค) ที่ f เริ่มต้นค่าของ Z' ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 2 – 14 MΩ และเมื่อเพิ่ม f ให้สูงขึ้นค่าของ Z' ของทุกรูปจะค่อยๆ ลดลงและรวมกันเป็นจุดเดียวจนมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

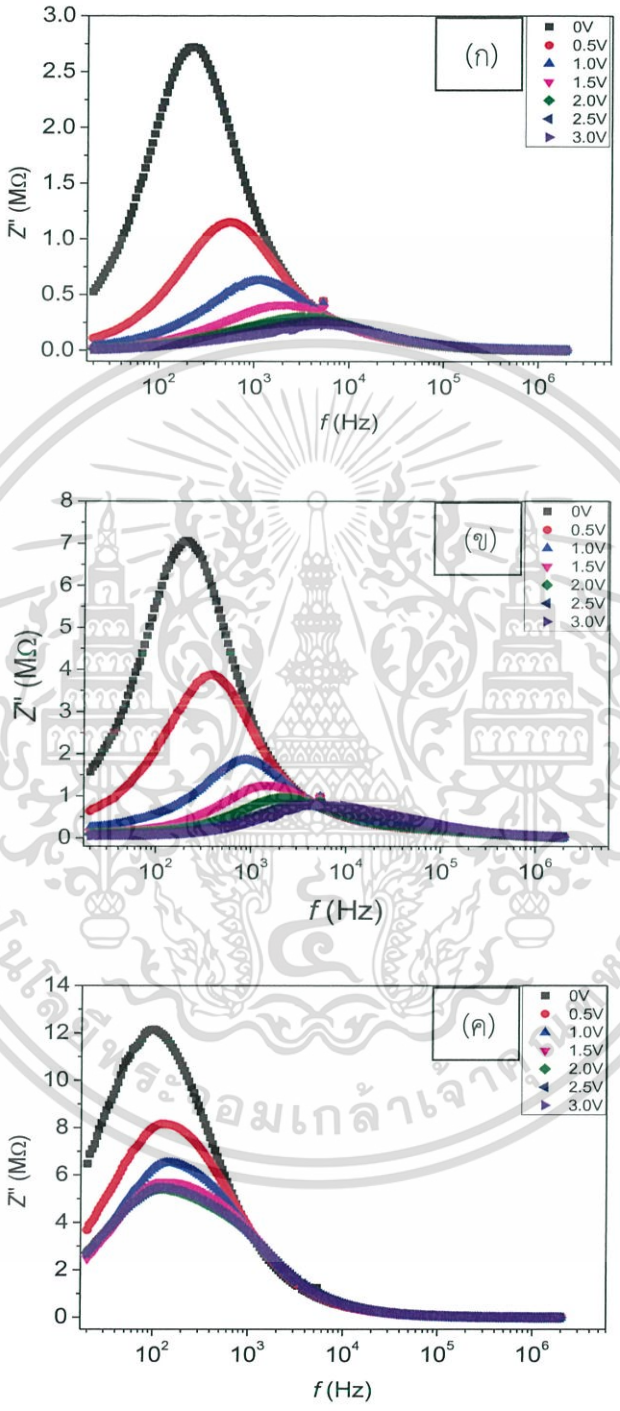


รูปที่ 4.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือสาร B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่มืด

จากรูปที่ 4.3 ค่า V ที่ทำให้ค่า Z'' มีค่าสูงที่สุดคือ 0 V และค่า Z'' ที่สูงที่สุดจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มค่า V และจากรูปที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นว่า ค่า Z'' เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ f ที่ใช้จนกระทั่งถึงพีคสูงสุด Z''_{max} และจากนั้นเมื่อเพิ่มค่า f ค่า Z'' จะค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นเมื่อทำ

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

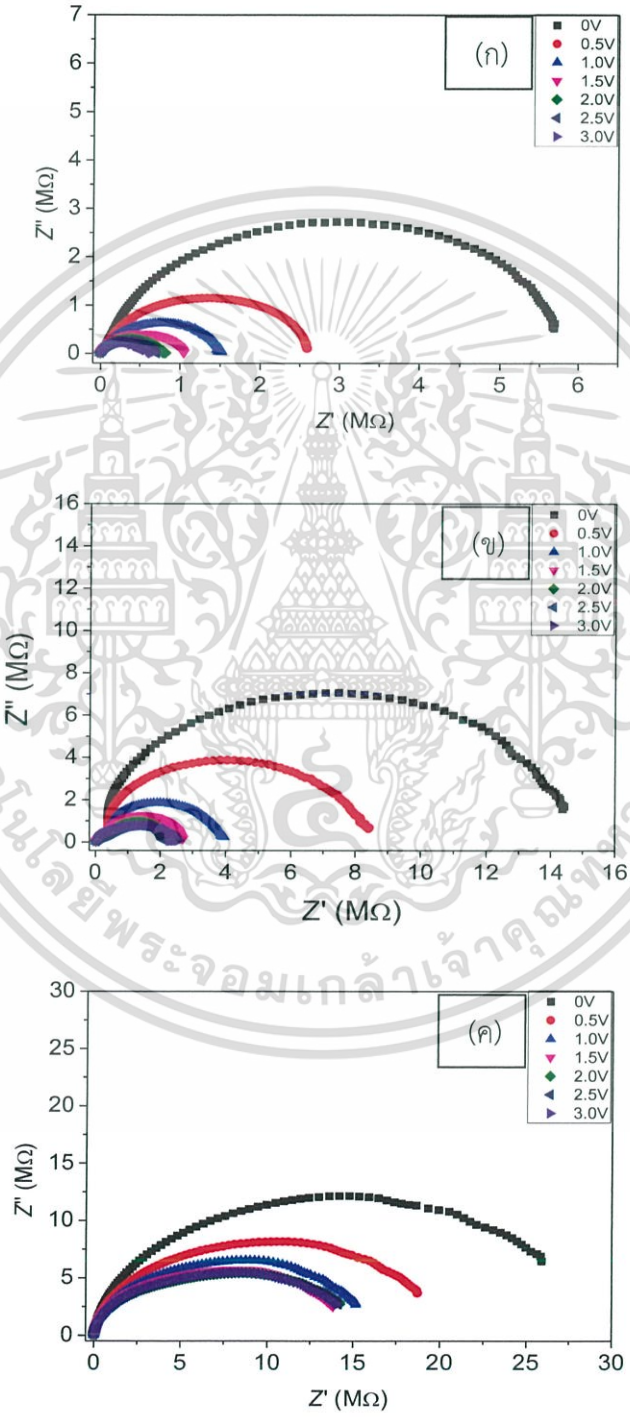
การเพิ่มค่า f ต่อไปเรื่อยๆ ค่าของ Z'' ของทุกช่วง V จะรวมกันเป็นจุดเดียว รูปที่ 4.3 (ก), (ข) และ (ค) ค่า Z'' จะลดลงจนเริ่มเป็นศูนย์ในช่วง f ที่ 10^4 Hz และ มีค่า Z''_{max} ประมาณ 2.75 MΩ 13 MΩ และ 7.5 MΩ ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' *กับ* f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือสาร B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่มืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

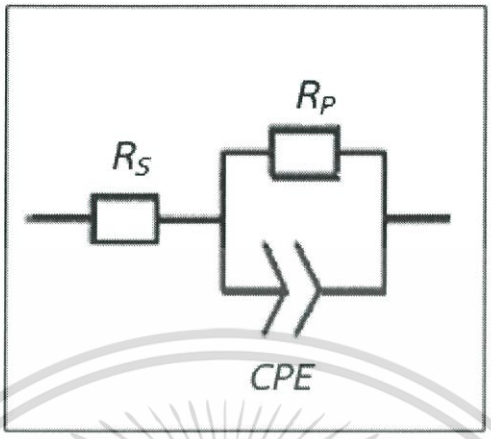
จากรูป 4.4 (ก), (ข), (ค) แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน UNCD/a-C:H/Si ที่มีการเจือ B 0.1%, 5% และ 20% ในที่มืด พบว่ารูปทั้งหมดแสดงลักษณะของกราฟเป็นครึ่งวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน X ซึ่งจะทำให้ลักษณะของครึ่งวงกลมนั้นบานออก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าแต่ละรูปจะมีช่วง V ที่ทำให้ครึ่งวงกลมมีรัศมีสูงที่สุดคือ 0 V และ รัศมีของครึ่งวงกลมจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มค่า V



รูปที่ 4.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่มืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะของกราฟครึ่งวงกลมของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน UNCD/a-C:H/Si ที่มีการเจือ B 0.1%, 5% และ 20% ในที่มืดสอดคล้องกับวงจรสมมูลที่มี R_S ต่ออนุกรมอยู่กับ R_P ขนานกับ *CPE* ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B ในที่มืด

จากรูปที่ 4.5 จะได้สมการอิมพีแดนซ์จากวงจรดังนี้

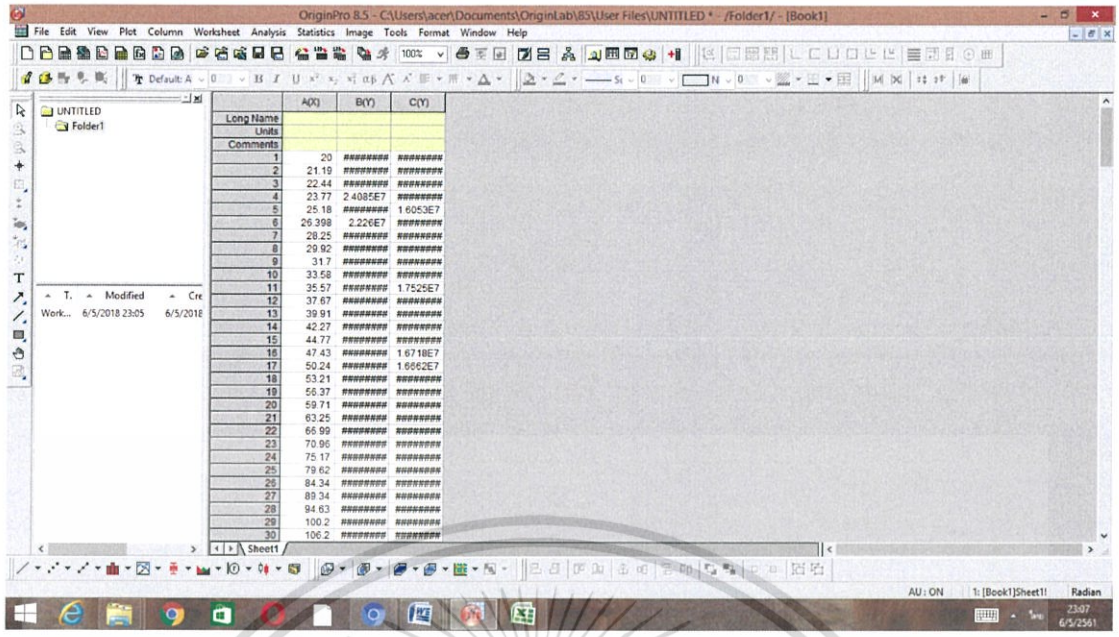
$$Z(f) = R_1 + \frac{R_2}{R_2 Q_2 (i2\pi f)^{\alpha 2} + 1}$$

โดยจะแสดงค่า C_{PE}, R_s, R_p จากโปรแกรม Origin และโปรแกรม EC-Lab ที่จำลองออกมาและเปรียบเทียบที่แต่ละโวลต์ ตั้งแต่ -3.0 V ถึง -0.1 V

โดยจะใช้โปรแกรมในการพลอตกราฟและบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าแล้วนำข้อมูลที่บันทึกไว้ไปเปิดในโปรแกรม EC-Lab แสดงการใช้โปรแกรมได้ดังนี้

จากรูปที่ 4.6 หลังจากที่นำข้อมูลมาใส่ในโปรแกรม Origin แล้วต่อมาก็ให้เปิดโปรแกรม EC-Lab เพื่อนำข้อมูลจากโปรแกรม Origin มาสร้างกราฟเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวงจรสมมูล

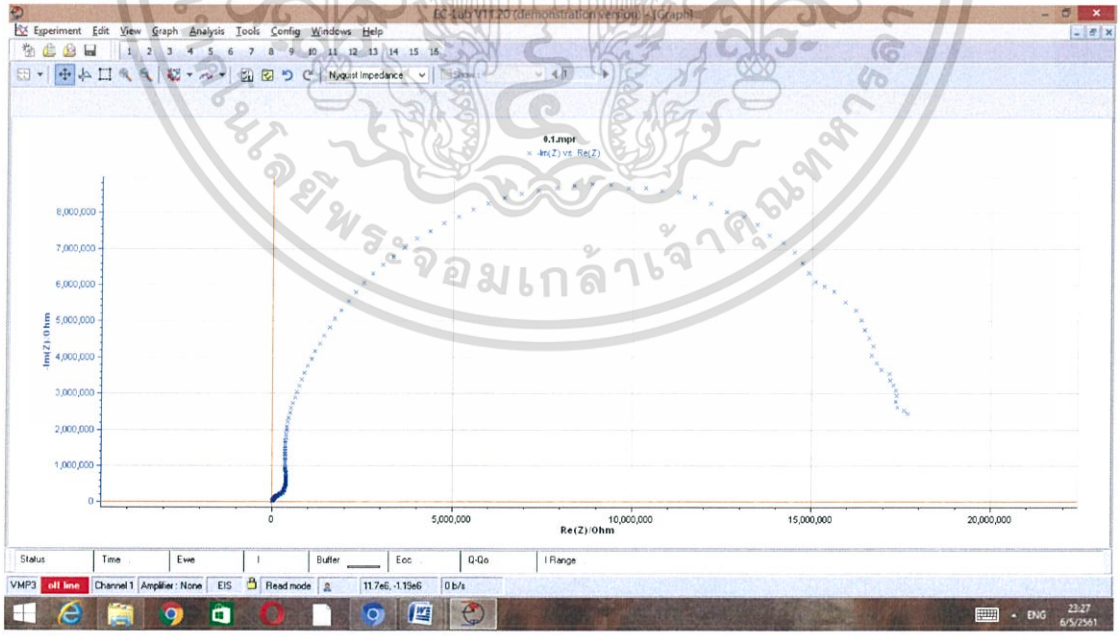
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงโปรแกรม Origin เพื่อใช้ในการสร้างกราฟและบันทึกข้อมูล

โดยเมื่อเปิดโปรแกรม EC-Lab แล้วให้กดไปที่คำสั่ง Experiment ต่อมาให้เลือกคำสั่ง Import From text เพื่อกำหนดแกนต่างๆ ดังนี้

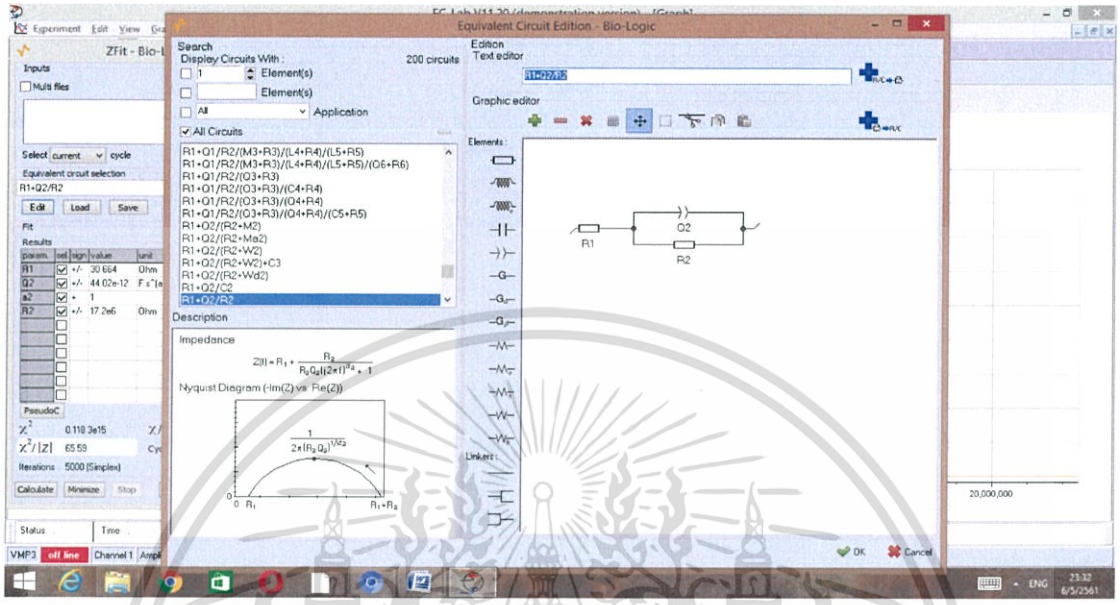
จากรูปที่ 4.7 เมื่อได้ข้อมูลมาแล้ว ให้กดไปที่คำสั่ง Z-fit และเลือกไปที่โหมดการวัด Electrochemical Impedance Spectroscopy ก็แสดงดังภาพด้านล่าง



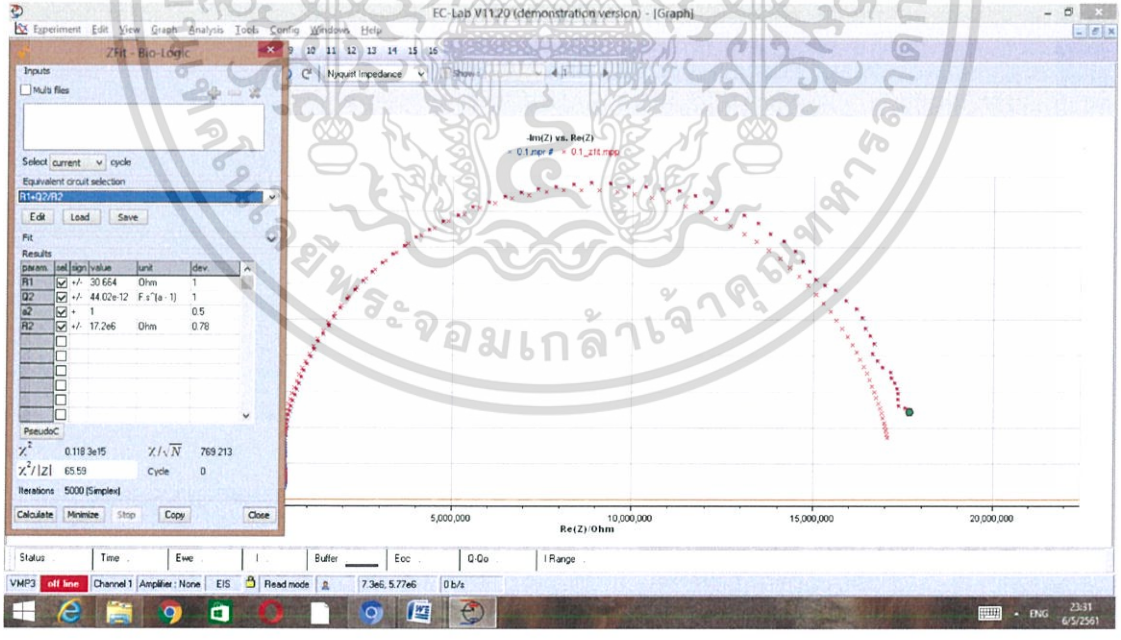
รูปที่ 4.7 โปรแกรม EC-Lab แสดงข้อมูลกราฟจากการวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 ให้ทำการเลือกหาวงจรสมมูลที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ทำมาใช้ในที่นี้เป็นวงจรที่ประกอบไปด้วยค่า R_s, C_{PE} และ α ซึ่งจะแสดงออกมาที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแต่ละค่าตั้งแต่ -3.0 V ถึง 3.0 V



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรสมมูลและสมการที่สอดคล้อง



รูปที่ 4.9 แสดงค่า R, C_{PE}, α ที่จำลองค่าที่เหมาะสมได้จากวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.1 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE จะมีค่าใกล้เคียงกันตาม V ที่เพิ่มขึ้น และค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือสาร B 0.1% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลอง

V (V)	R_S (Ω)	CPE (F)	α	R_P (Ω)
0.0	1232	5.14×10^{-10}	0.8167	5.87×10^{6}
0.2	1223	5.05×10^{-10}	0.8175	4.52×10^{6}
0.4	1210	4.84×10^{-10}	0.8201	3.23×10^{6}
0.6	1208	4.55×10^{-10}	0.8241	2.44×10^{6}
0.8	1204	4.20×10^{-10}	0.8292	1.91×10^{6}
1.0	1191	3.79×10^{-10}	0.8361	1.54×10^{6}
1.2	1171	3.40×10^{-10}	0.8431	1.30×10^{6}
1.4	1160	3.01×10^{-10}	0.8511	1.12×10^{6}
1.6	1150	2.64×10^{-10}	0.8596	9.79×10^{5}
1.8	1112	2.34×10^{-10}	0.8670	8.85×10^{5}
2.0	1080	2.08×10^{-10}	0.8739	7.67×10^{5}
2.2	1050	2.02×10^{-10}	0.8746	7.66×10^{5}
2.4	1008	1.98×10^{-10}	0.8734	6.97×10^{5}
2.6	906	1.95×10^{-10}	0.8681	6.76×10^{5}
2.8	808	1.92×10^{-10}	0.8734	6.57×10^{5}
3.0	709	1.84×10^{-10}	0.8643	5.96×10^{5}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.2 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE เมื่อทำการเพิ่ม V จะมีค่าใกล้เคียงกัน และค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือสาร B 5% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลอง

V (V)	R_S (Ω)	CPE (F)	α	R_P (Ω)
0.0	4107	3.59×10^{-11}	0.8055	1.42×10^{7}
0.2	4105	3.51×10^{-11}	0.9687	1.40×10^{7}
0.4	4103	3.44×10^{-11}	1.0000	9.52×10^{6}
0.6	4101	3.37×10^{-11}	0.9839	8.51×10^{6}
0.8	4009	3.27×10^{-11}	0.9470	6.67×10^{6}
1.0	4007	3.17×10^{-11}	1.0000	4.04×10^{6}
1.2	4005	3.08×10^{-11}	0.9420	3.06×10^{6}
1.4	4003	3.00×10^{-11}	0.9270	2.84×10^{6}
1.6	4001	2.93×10^{-11}	0.9557	2.57×10^{6}
1.8	4099	2.87×10^{-11}	0.9827	2.40×10^{6}
2.0	4096	2.81×10^{-11}	0.9749	2.33×10^{6}
2.2	4094	2.75×10^{-11}	0.9251	2.22×10^{6}
2.4	4092	2.70×10^{-11}	0.9480	2.19×10^{6}
2.6	4090	2.65×10^{-11}	0.9998	2.10×10^{6}
2.8	4088	2.63×10^{-11}	0.9686	2.00×10^{6}
3.0	4085	2.57×10^{-11}	0.9244	1.96×10^{6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

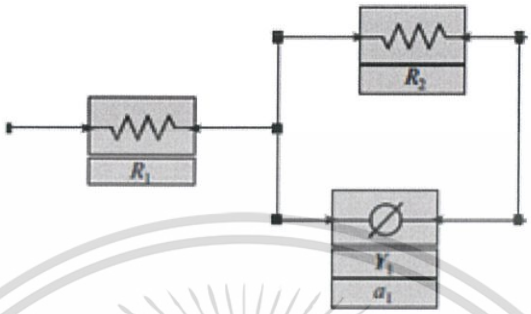
จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.3 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE เมื่อทำการเพิ่ม V จะมีค่าลดลงเล็กน้อยและค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือสาร B 20% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลอง

V (V)	R_S (Ω)	CPE (F)	α	R_P (Ω)
0.0	5270	1.10×10^{-10}	0.7712	2.61×10^{7}
0.2	5180	5.23×10^{-11}	0.7708	2.36×10^{7}
0.4	5068	5.15×10^{-11}	0.7718	1.91×10^{7}
0.6	5041	4.59×10^{-11}	0.7132	1.73×10^{7}
0.8	5002	3.32×10^{-11}	0.9680	1.58×10^{7}
1.0	4943	2.13×10^{-11}	0.7841	1.47×10^{7}
1.2	4885	1.63×10^{-11}	0.8186	1.44×10^{7}
1.4	4721	1.09×10^{-11}	0.5913	1.40×10^{7}
1.6	4655	1.06×10^{-11}	0.8523	1.38×10^{7}
1.8	4596	1.03×10^{-11}	0.8412	1.35×10^{7}
2.0	4475	1.00×10^{-11}	0.8433	1.32×10^{7}
2.2	4381	9.74×10^{-12}	0.9647	1.29×10^{7}
2.4	4208	9.60×10^{-12}	0.9995	1.27×10^{7}
2.6	4173	9.20×10^{-12}	0.8281	1.24×10^{7}
2.8	4008	8.20×10^{-12}	0.8033	1.21×10^{7}
3.0	3938	7.80×10^{-12}	0.7665	1.18×10^{7}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

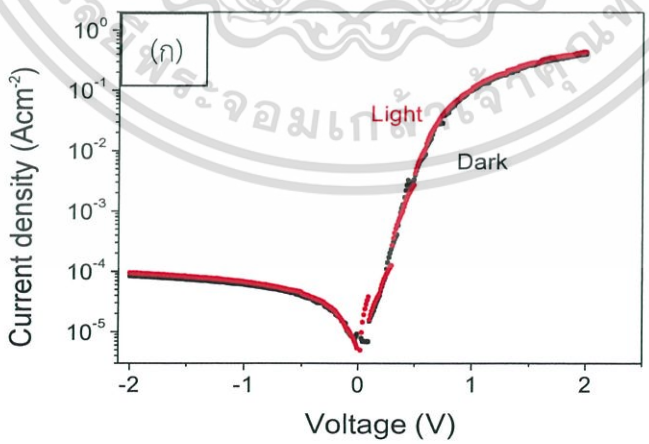
จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 โดยจะเห็นค่าR_sและ R_pมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE เมื่อทำการเพิ่ม V จะมีค่าลดลงและค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.10 ซึ่งประกอบไปด้วย R_S อนุกรมอยู่กับ R_P ขนานกับ CPE ซึ่งประกอบไปด้วย R_1 อนุกรมอยู่กับ R_2 ขนานกับ CPE โดยที่ R_1 คือ R_S, R_2 คือ R_P และ ϕ ขนานกับ γ_1 และ a_1 คือ CPE



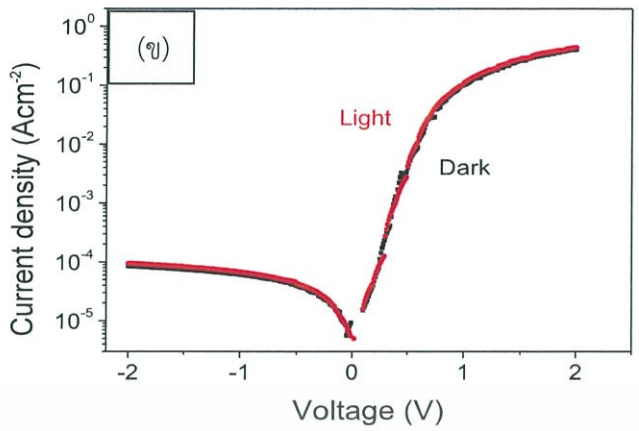
รูปที่ 4.10 วงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 0.1%, 5% และ 20% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร

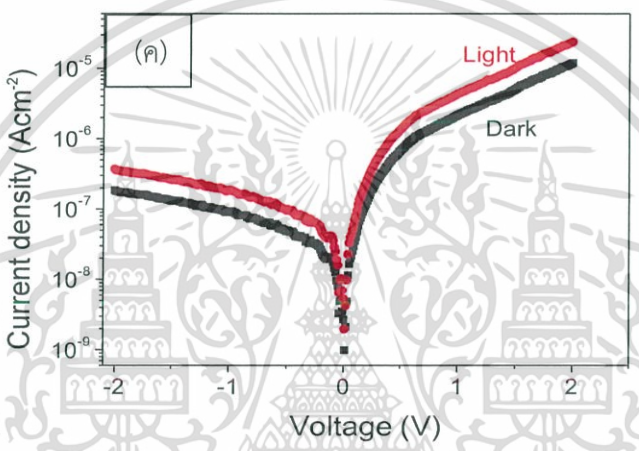
4.2 การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ I - V, Z' – f, Z'' – f และ Z'' - Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B ในปริมาณที่ต่างกันในที่ฉายแสง

จากรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือสาร B ในปริมาณที่ต่างกันคือ (ก) 0.1%, (ค) 5% และ (ง) 20% และศึกษาในที่ฉายแสงเพื่อเป็นการตรวจสอบการตรวจจับแสง จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ากระแสเนื่องจากแสง UV มีค่ามากกว่ากระแสรั่วเล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

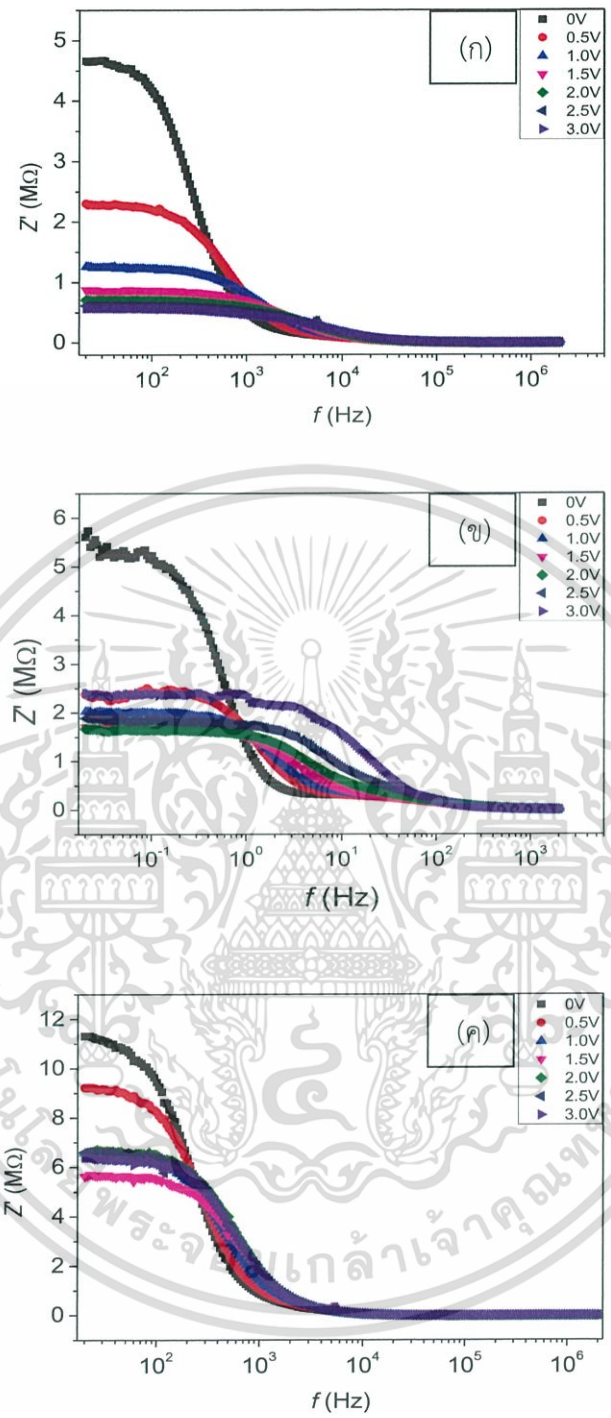




รูปที่ 4.11 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง *I* กับ *V* ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่ฉายแสง

จากรูปที่ 4.12 ค่า *V* ที่ทำให้ค่า Z' มีค่าสูงที่สุดคือ 0 V และค่า Z' ที่สูงที่สุดจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเพิ่มค่า *V* จะเห็นว่ารูปที่ 4.2 (ก) ที่ *f* เริ่มต้นค่าของ Z' ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 4.5 MΩ รูปที่ 4.2 (ข) ที่ *f* เริ่มต้นค่าของ Z' ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 5 – 11 MΩและ รูปที่ 4.2 (ค) ที่ *f* เริ่มต้นค่าของ Z' ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 5.5 MΩ และเมื่อเพิ่ม *f* ให้สูงขึ้น ค่าของ Z' ของทุกรูปจะค่อยๆ ลดลงและรวมกันเป็นจุดเดียวจนมีค่าเป็นศูนย์

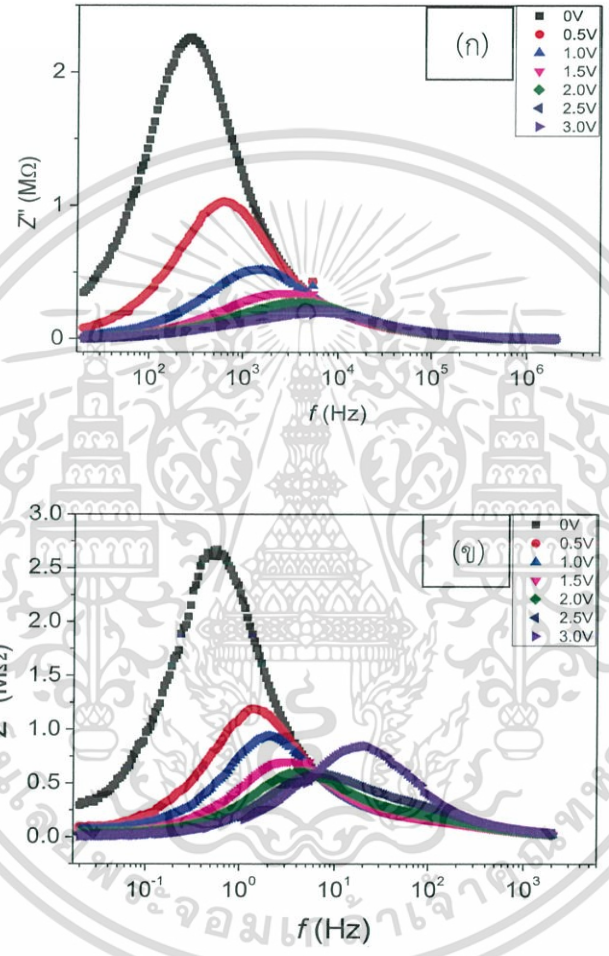
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



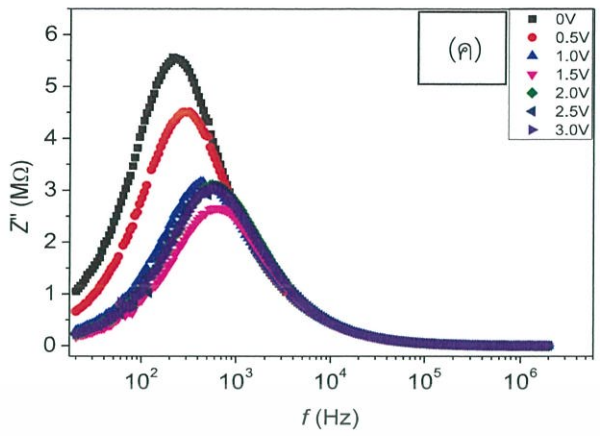
รูปที่ 4.12 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20% ในที่ฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 ค่า V ที่ทำให้ค่า Z'' มีค่าสูงที่สุดคือ 0 V และค่า Z'' ที่สูงที่สุดจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเพิ่มค่า V และจากรูปที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นว่า ค่า Z'' เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ f ที่ใช้จนกระทั่งถึงพีคสูงสุด Z''_{max} และจากนั้นเมื่อเพิ่มค่า f ค่า Z'' จะค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มค่า f ต่อไปเรื่อยๆ ค่าของ Z''ของทุกช่วง V จะรวมกันเป็นจุดเดียว รูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) และ (ค) ค่า Z'' จะลดลงจนเริ่มเป็นศูนย์ในช่วง f ที่ 10^4 Hz และ (ค) ค่า Z'' จะลดลงจนเริ่มเป็นศูนย์ในช่วง f ที่ 10^2 Hz มีค่า Z''_{max} ประมาณ 2.25 MΩ 6 MΩ และ 2.75 MΩ ตามลำดับ

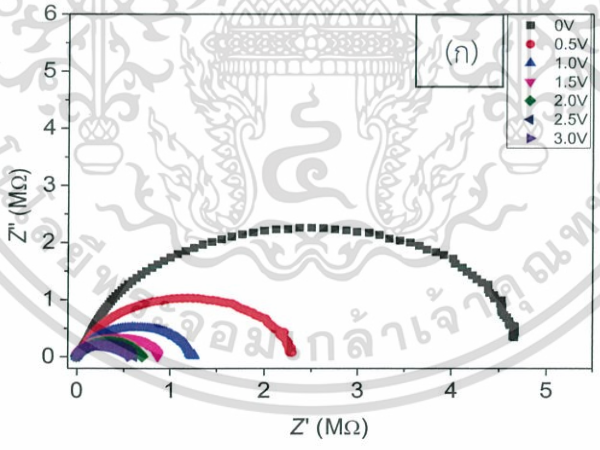


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

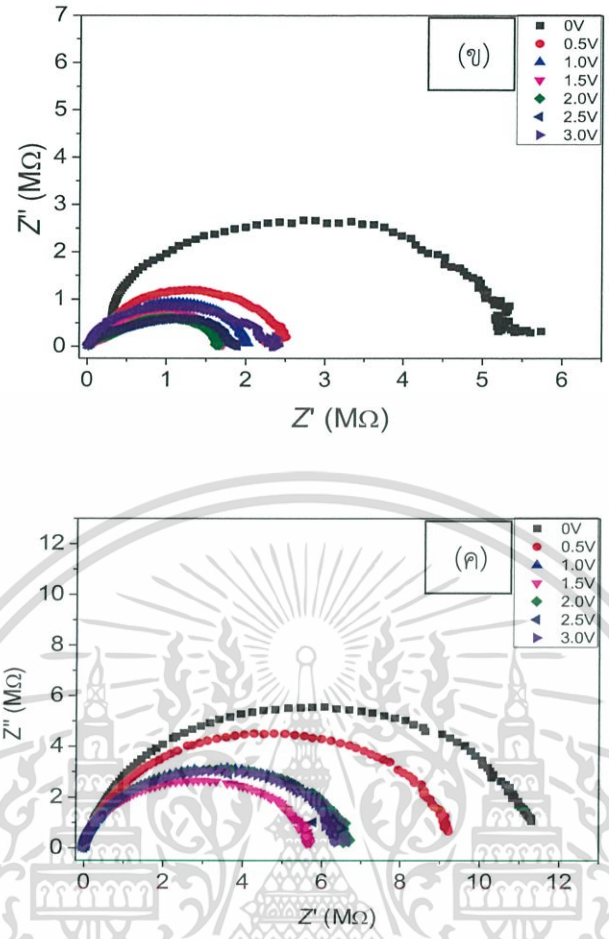


รูปที่ 4.13 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B ในที่ฉายแสง (ก) 0.1%, (ข) 5%, และ (ค) 20%

จากรูป 4.14 (ก), (ข), (ค), แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน UNCD/a-C:H/Si ที่มีการเจือ B 0.1%, 5% และ 20% ในที่ฉายแสงพบว่ารูปทั้งหมดแสดงลักษณะของกราฟเป็นครึ่งวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน X ซึ่งจะทำให้ลักษณะของครึ่งวงกลมนั้นบานออก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าแต่ละรูปจะมีช่วง V ที่ทำให้ครึ่งวงกลมมีรัศมีสูงที่สุดคือ 0 V และรัศมีของครึ่งวงกลมจะค่อยๆ ลดลงเมื่อลดค่า V



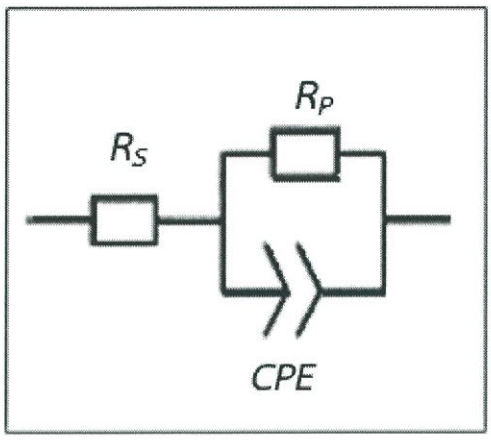
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'' - Z'$ ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B (ก) 0.1%, (ข) 5% และ (ค) 20%ในที่ฉายแสง

จากลักษณะของกราฟครึ่งวงกลมของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน UNCD/a-C:H/Si ที่มีการเจือ B 0.1%, 5% และ 20% ในที่ฉายแสง สอดคล้องกับวงจรสมมูลที่มี R_S ต่ออนุกรมอยู่กับ R_P ขนาดกับ *CPE* ดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ B ในที่ฉายแสง

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.4 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE จะมีค่าลดลงเล็กน้อยตาม V ที่เพิ่มขึ้น และค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 0.1% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลอง

V (V)	R_S (Ω)	CPE (F)	α	R_P (Ω)
0.0	1666	5.33×10^{-10}	0.8149	4.78×10^{6}
0.2	1519	5.23×10^{-10}	0.8158	3.53×10^{6}
0.4	1450	5.02×10^{-10}	0.8183	2.65×10^{6}
0.6	1352	4.66×10^{-10}	0.8229	2.08×10^{6}
0.8	1257	4.17×10^{-10}	0.8303	1.53×10^{6}
1.0	1158	3.71×10^{-10}	0.8380	1.28×10^{6}
1.2	1040	3.28×10^{-10}	0.8461	1.08×10^{6}
1.4	1031	2.85×10^{-10}	0.8553	9.33×10^{5}
1.6	1014	2.43×10^{-10}	0.8655	8.12×10^{5}
1.8	1001	2.15×10^{-10}	0.8729	7.41×10^{5}
2.0	980	1.97×10^{-10}	0.8775	6.89×10^{5}
2.2	969	1.96×10^{-10}	0.8751	6.33×10^{5}
2.4	954	1.94×10^{-10}	0.8711	5.93×10^{5}
2.6	942	1.90×10^{-10}	0.8678	5.85×10^{5}
2.8	929	1.88×10^{-10}	0.8627	5.62×10^{5}
3.0	909	1.80×10^{-10}	0.8597	5.44×10^{5}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.5 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE จะมีค่าใกล้เคียงกันตาม V ที่เพิ่มขึ้นและค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน UNCD/a-C:H/Si ที่มีการเจือสาร B 5% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลอง

V (V)	R_S (Ω)	CPE (F)	α	R_P (Ω)
0.0	4207	4.15×10^{-11}	0.8055	5.53×10^{6}
0.2	4205	4.12×10^{-11}	0.9687	3.48×10^{6}
0.4	4203	4.03×10^{-11}	1.0000	2.97×10^{6}
0.6	4201	3.91×10^{-11}	0.9839	2.69×10^{6}
0.8	4109	3.79×10^{-11}	0.9470	2.51×10^{6}
1.0	4107	3.69×10^{-11}	1.0000	2.40×10^{6}
1.2	4105	3.61×10^{-11}	0.9420	2.28×10^{6}
1.4	4103	3.52×10^{-11}	0.9270	2.12×10^{6}
1.6	4101	3.48×10^{-11}	0.9557	2.10×10^{6}
1.8	4099	3.43×10^{-11}	0.9827	2.08×10^{6}
2.0	4086	3.38×10^{-11}	0.9749	2.05×10^{6}
2.2	4074	3.33×10^{-11}	0.9251	2.00×10^{6}
2.4	4062	3.27×10^{-11}	0.9480	1.95×10^{6}
2.6	4050	3.18×10^{-11}	0.9998	1.90×10^{6}
2.8	4042	3.10×10^{-11}	0.9686	1.85×10^{6}
3.0	4035	3.03×10^{-11}	0.9244	1.71×10^{6}

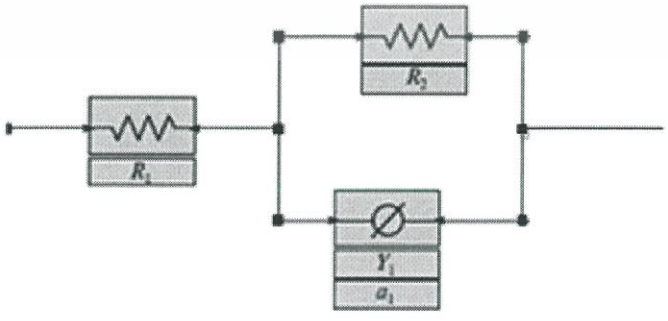
จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.6 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE เมื่อทำการเพิ่ม V จะมีค่าลดลงเล็กน้อยและค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 20% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลอง

V (V)	R_S (Ω)	CPE (F)	α	R_P (Ω)
0.0	5260	5.31×10^{-11}	0.9993	1.12×10^{7}
0.2	5166	5.21×10^{-11}	0.7654	1.10×10^{7}
0.4	5055	1.08×10^{-11}	0.8765	9.89×10^{6}
0.6	4925	1.01×10^{-11}	0.9193	8.53×10^{6}
0.8	4860	1.00×10^{-11}	0.7733	7.06×10^{6}
1.0	4699	4.53×10^{-12}	0.7783	6.51×10^{6}
1.2	4531	3.25×10^{-12}	0.8182	5.98×10^{6}
1.4	4455	2.24×10^{-12}	0.8384	5.53×10^{6}
1.6	4379	1.09×10^{-12}	0.8333	5.46×10^{6}
1.8	4239	1.07×10^{-12}	0.7969	4.93×10^{6}
2.0	4129	1.06×10^{-12}	0.8610	4.82×10^{6}
2.2	4075	1.05×10^{-12}	0.9251	4.78×10^{6}
2.4	3926	1.04×10^{-12}	0.9480	4.64×10^{6}
2.6	3869	1.03×10^{-12}	0.9998	4.30×10^{6}
2.8	3737	1.02×10^{-12}	0.9686	4.27×10^{6}
3.0	3583	1.01×10^{-12}	0.9244	4.23×10^{6}

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE เมื่อทำการเพิ่ม V จะมีค่าใกล้เคียงกันและค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งประกอบไปด้วย R_1 อนุกรมอยู่กับ R_2 ขนานกับ CPE โดยที่ R_1 คือ R_S, R_2 คือ R_P และ ϕ ขนานกับ γ_1 และ a_1 คือ CPE

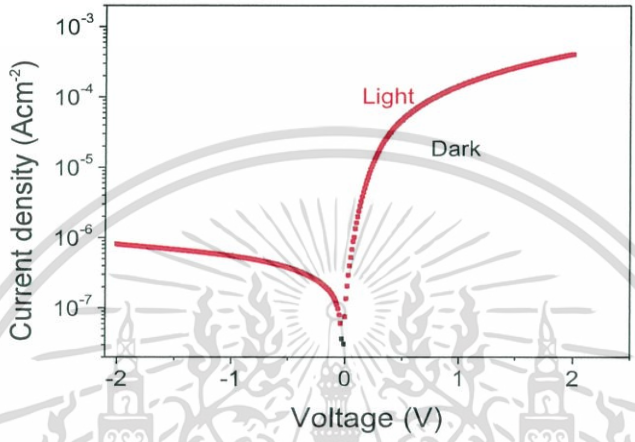


รูปที่ 4.16 วงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ B 0.1%, 5% และ 20% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ *I - V*, *Z' – f*, *Z'' – f* และ *Z'' - Z'* ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N ในปริมาณ 3% ทั้งในที่มืดและในที่ฉายแสง

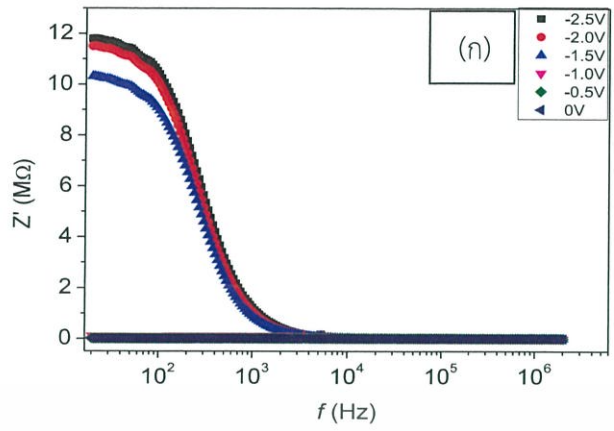
จากรูปที่ 4.17 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ *I-V* ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือสาร N 3% ในที่มืดและที่ฉายแสงเพื่อซึ่งจากกราฟ *I-V* กระแสเนื่องจากแสง UV มีค่ามากกว่ากระแสในที่มืดเล็กน้อย จะสังเกตได้ว่าลักษณะความสัมพันธ์ของเฮทเทอโรจังค์ชันมีคุณสมบัติความเป็นไดโอด

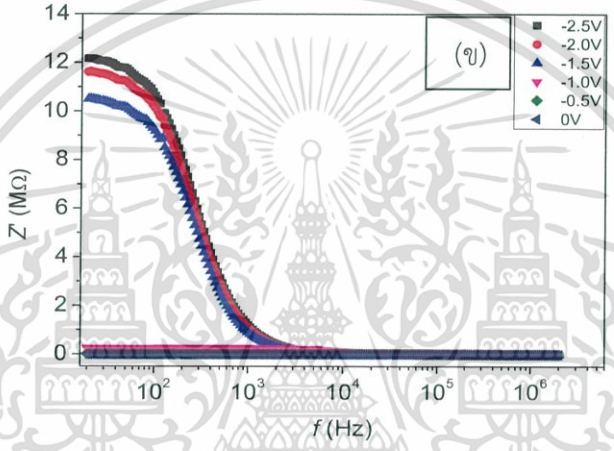


รูปที่ 4.17 ลักษณะความสัมพันธ์ *I –V* ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสง

จากรูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าที่ค่า *f* ต่ำค่าของ *Z'* ในช่วง *V* ที่เป็นบวกจะมีค่าต่ำกว่าช่วง *V* ที่เป็นลบและที่ *f* เริ่มต้นค่าของ *Z'* ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 3.6 MΩ และ 0 – 3.4 MΩ และเมื่อเพิ่ม *f* ให้สูงขึ้นค่าของ *Z'* ของทั้งสองรูปจะค่อยๆลดลงและรวมกันเป็นจุดเดียวจนมีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างจะเห็นได้ว่าค่า *Z'* ในที่ฉายแสงมีค่าสูงสุดน้อยกว่าค่า *Z'* ที่วัดจากในที่มืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

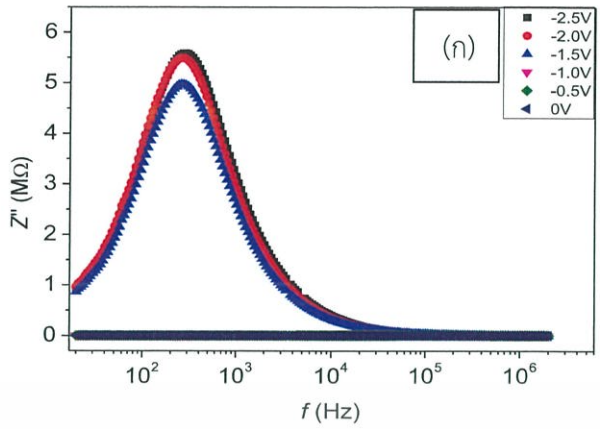


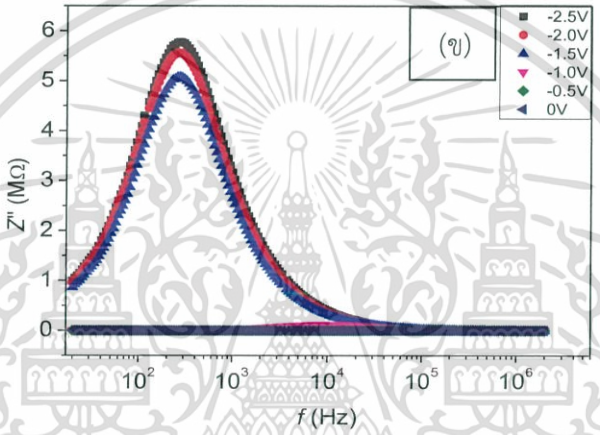


รูปที่ 4.18 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสง

จากรูปที่ 4.19 (ก) และ (ข) จะแสดงให้เห็นว่า ค่า Z'' เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ f ที่ใช้ จนกระทั่งถึงพีคสูงสุด Z''_{max} และจากนั้นเมื่อเพิ่มค่า f ค่า Z'' จะค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มค่า f ต่อไปเรื่อยๆ ค่าของ Z'' ของทุกช่วง V จะรวมกันเป็นจุดเดียว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างจะเห็นได้ว่าค่าส่วนจินตภาพในที่ฉายแสงมีค่าสูงสุดน้อยกว่าค่าส่วนจริงที่วัดจากในที่มืด

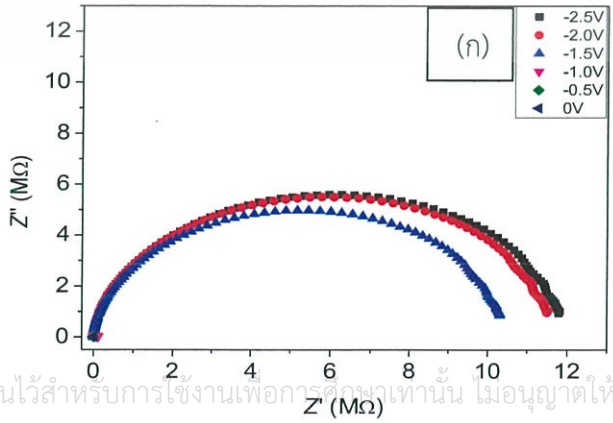
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



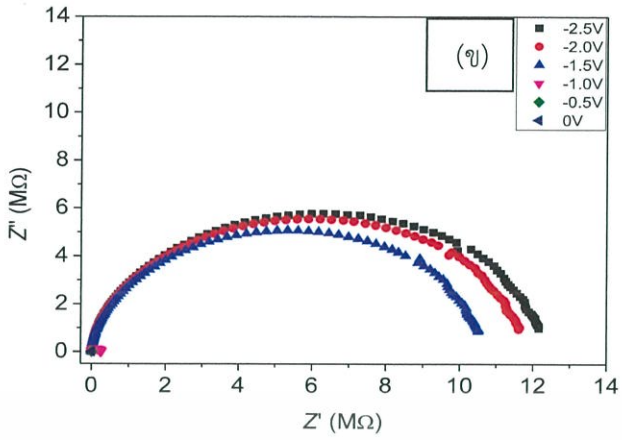


รูปที่ 4.19 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ f ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสง

จากรูป 4.20 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' – Z' โดยทั้งสองรูปแสดงลักษณะของกราฟเป็นครึ่งวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน X ทั้งคู่ ซึ่งจะทำให้ลักษณะของครึ่งวงกลมนั้นบานออก ทั้งในที่มืดและที่ฉายแสงช่วง V ที่ทำให้มีรัศมีของกราฟสูงที่สุดคือ -2.5 V ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบนั้นค่าของทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

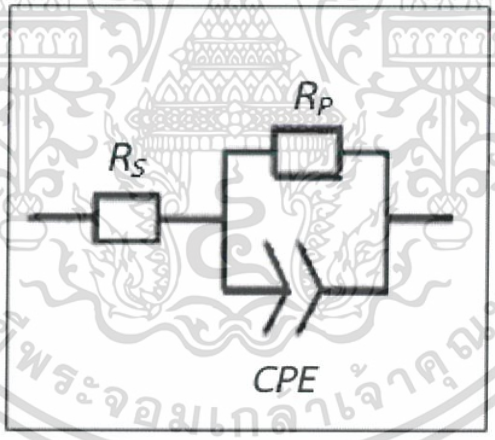


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' - Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสง

จากลักษณะของกราฟครึ่งวงกลมของเฮทเทอร์โรจังค์ชัน UNCD/a-C:H/Si ที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและที่ฉายแสงสอดคล้องกับวงจรสมมูลที่มี R_S ต่ออนุกรมอยู่กับ R_P ขนาดกับ *CPE* ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 วงจรสมมูลของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Z'' กับ Z' ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและที่ฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE จะมีค่าลดลงเล็กน้อยตาม V ที่เพิ่มขึ้น และค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดโดยใช้โปรแกรมจำลอง

V (V)	R_S (Ω)	CPE (F)	α	R_P (Ω)
-2.5	3463	1.06×10^{-10}	1.0000	1.15×10^{7}
-2.4	3450	8.58×10^{-11}	0.9948	1.14×10^{7}
-2.2	3444	7.30×10^{-11}	0.9994	1.13×10^{7}
-2.0	3443	6.51×10^{-11}	0.9859	1.12×10^{7}
-1.8	3438	6.00×10^{-11}	0.9952	1.10×10^{7}
-1.6	3429	5.62×10^{-11}	0.9800	1.05×10^{7}
-1.4	3416	5.35×10^{-11}	0.9746	9.13×10^{6}
-1.2	3410	5.11×10^{-11}	0.9988	1.21×10^{6}
-1.0	3358	4.80×10^{-11}	0.9528	1.15×10^{5}
-0.8	3249	4.55×10^{-11}	0.9831	3.58×10^{4}
-0.6	3144	4.34×10^{-11}	0.9449	1.83×10^{4}
-0.4	3068	4.16×10^{-11}	0.9957	1.10×10^{4}
-0.2	3000	4.00×10^{-11}	0.9946	7.41×10^{3}
0.0	2874	3.93×10^{-11}	0.8055	5.14×10^{3}

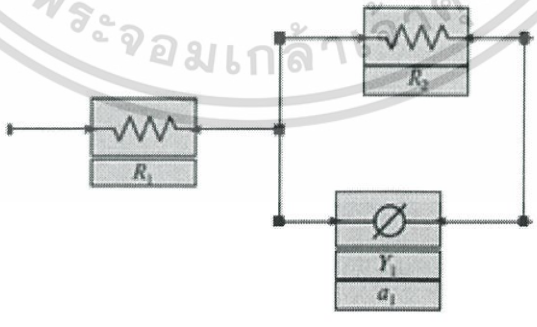
จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.8 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE จะมีค่าลดลงเล็กน้อยตาม V ที่เพิ่มขึ้นและค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ Z ของวงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ N 3% ในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลอง

V (V)	R_S (Ω)	CPE (F)	α	R_P (Ω)
-2.5	3683	8.98×10^{-11}	1.0000	1.21×10^{7}
-2.4	3637	7.49×10^{-11}	0.9948	1.20×10^{7}
-2.2	3606	6.98×10^{-11}	0.9994	1.25×10^{7}
-2.0	3595	6.31×10^{-11}	0.9859	1.15×10^{7}
-1.8	3497	5.86×10^{-11}	0.9952	1.12×10^{7}
-1.6	3493	5.50×10^{-11}	0.9800	1.08×10^{7}
-1.4	3466	5.27×10^{-11}	0.9746	1.00×10^{7}
-1.2	3465	4.96×10^{-11}	0.9988	4.69×10^{6}
-1.0	3459	4.69×10^{-11}	0.9528	2.58×10^{5}
-0.8	3454	4.46×10^{-11}	0.9831	5.71×10^{4}
-0.6	3448	4.26×10^{-11}	0.9449	2.35×10^{4}
-0.4	3439	6.44×10^{-11}	0.9957	1.30×10^{4}
-0.2	3431	3.94×10^{-11}	0.9946	1.01×10^{4}
0.0	3406	3.94×10^{-11}	0.9946	6.53×10^{3}

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.8 โดยจะเห็นค่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม V ที่เพิ่มขึ้น ค่า CPE จะมีค่าใกล้เคียงกันตาม V ที่เพิ่มขึ้นและค่า α ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าตามอุดมคติ ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งประกอบไปด้วย R_1 อนุกรมอยู่กับ R_2 ขนานกับ CPE โดยที่ R_1 คือ R_S, R_2 คือ R_P และ ϕ ขนานกับ γ_1 และ a_1 คือ CPE



รูปที่ 4.22 วงจรสมมูลของเฮทเทอโรจังค์ชัน Si/UNCD ที่มีการเจือ N 3% ในที่มืดและในที่ฉายแสงโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ศึกษาค่า Z ของเฮทเทอร์โรจังค์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย UNCD/a-C:H และ Si ที่มี f ต่างกัน จากนั้นศึกษาผลของปริมาณสารเจือ B และ N ลงใน UNCD/a-C:H ที่มีผลต่อค่า Z และวิเคราะห์แบบจำลองของวงจรสมมูลจากลักษณ์ของค่า Z ที่ได้จากการวัด

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาแบบจำลองของวงจรสมมูลในสารเจือแต่ละชนิดแต่ละเปอร์เซ็นประกอบไปด้วย UNCD ที่เจือด้วย B ที่ 0.1%, 5% และ 20% ในที่มืดกับในที่ฉายแสง และ UNCD ที่เจือด้วย N ที่ 3% ในที่มืดกับในที่ฉายแสง โดยทำการทดลองเพื่อหาค่า R_s, R_p, และ CPE ซึ่งค่า R_s, R_p และ CPE สามารถหาได้จากโปรแกรม EC-Lab และสังเกตความเปลี่ยนของแต่ละเปอร์เซ็นต์

กรณีในที่มืด ที่ 0 V ของ UNCD ที่มีการเจือสาร B ที่ 0.1% ค่า R_s = 5270 Ω, R_p = 4.78 x 10^6 Ω, CPE =5.33 x 10^{-10} F ที่ 5% ค่า R_s = 4207 Ω, R_p = 2.61 x 10^7 Ω, CPE = 3.59 x 10^{-11} F ที่ 20% ค่า R_s = 1232 Ω, R_p = 1.42 x 10^7 Ω, CPE = 1.10 x 10^{-10} F จากข้อมูลที่ได้เมื่อเปอร์เซ็นของสารเจือเพิ่มขึ้นค่า R_s กับ R_p จะเพิ่มขึ้น แต่ค่า CPE จะลงลดตามเปอร์เซ็นของสารเจือเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองตรงกลับวงจรสมมูลที่มี R_S ต่ออนุกรมอยู่กับ R_P ขนานกับ CPE เพราะเมื่อนำค่า Z' และค่า Z'' ที่ได้มาพลอตกราฟปรากฏว่าครึ่งวงกลมที่ได้จะมีค่าจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน X ทั้งหมดทุกเปอร์เซ็นของสารเจือในกรณีที่ฉายแสง UNCD ที่เจือ B ก็จะมีข้อมูลที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและใช้แบบจำลองวงจรสมมูลตัวเดียวกันซึ่งค่าที่ได้เป็นดังนี้ ที่ 0.1% ค่า R_s = 5260 Ω, R_p = 4.78 x 10^6 Ω, CPE = 5.33 x 10^{-10} F ที่ 5% ค่า R_s = 4207 Ω, R_p = 1.12 x 10^7 Ω, CPE = 4.15 x 10^{-11} F ที่ 20% ค่า R_s = 1666 Ω, R_p = 5.53 x 10^6 Ω, CPE = 5.31 x 10^{-11} F เช่นเดียวกับกรณีในที่มืด ในที่ฉายแสงก็ได้แบบจำลองตรงกลับวงจรสมมูลที่มี R_S ต่ออนุกรมอยู่กับ R_P ขนานกับ CPE เพราะเมื่อนำ Z' และ Z'' ที่ได้มาพลอตกราฟปรากฏว่าครึ่งวงกลมที่ได้จะมีค่าจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน X ทั้งหมดทุกเปอร์เซ็นการเจือสารส่วนในกรณีในที่มืดของ UNCD ที่เจือ N 3% มีค่า R_s = 2874 Ω, R_P = 5.14 x 10^3 Ω, CPE = 3.93 x 10^{-11} F ในกรณีในที่ฉายแสงของ UNCD ที่เจือสาร N 3% มีค่า R_S = 3406 Ω, R_P = 6.53 x 10^3 Ω, CPE = 3.94 x 10^{-11} F โดยในกรณีของ UNCD ที่เจือสาร N ข้อมูลที่ได้นั้นมีค่าต่างแตกกันไม่มากทั้ง 2 กรณี และเมื่อนำ Z' และ Z'' ที่ได้มาพลอตกราฟปรากฏว่าครึ่งวงกลมที่ได้จะมีค่าจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน X ทั้งในที่มืดและในที่ฉายแสงจึงทำให้ได้โมเดลตรงกลับวงจรสมมูลที่มี R_S ต่ออนุกรมอยู่กับ R_P ขนานกับ CPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) งานวิจัยนี้ควรมีการเปลี่ยนปริมาณสารเจือ N จาก เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง
2) งานวิจัยนี้ควรเพิ่มการวัดเฮทเทอร์โรจังค์ชันภายใต้อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาลักษณะวงจรสมมูลและตัวแปรสำคัญจากโปรแกรม EC-LAB
3) งานวิจัยนี้ควรใช้สารอื่นนอกจาก UNCD/a:C-H และ Si เพื่อวัดความต้านทานเชิงซ้อน
4) ควรจัดเตรียมตัวอย่างชิ้นงานด้วยวิธีอื่นนอกจาก PLD เช่น วิธีการเคลือบแบบอาร์คพลาสมา และศึกษา Z - f ของวงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Takanori Hanada, Shinya Ohmagari, Abdelrahman Zkria, Nathaporn Promros, and Tsuyoshi Yoshitake. 2017. Photodetection Characteristics of Heterojunctions Comprising p- Type Ultrananocrystalline Diamond Films and n- Type Si Substrates at Low Temperatures.

[2] Yuki Katamune, Shinya Ohmagari, Sausan Al- Riyami, Seishi Takagi, Mahmoud Shaban and Tsuyoshi Yoshitake. 2013. Heterojunction Diodes Comprising p-Type Ultrananocrystalline Diamond Films Prepared by Coaxial Arc Plasma Deposition and n-Type Silicon Substrates.

[3] Jenn-Kai Tsai, Jun Hong Shih, Tian-Chiuan Wu, Teen Hang Meen. 2012. n-ZnO nanorods/p^+-Si (111) heterojunction light emitting diodes. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : https://www.researchgate.net/figure/Heterojunction-LED-structure-and-light-emission-of-LED-a-The-schematic-diagram-of-the_fig4_233874781

[4] Physics and Radio Electronics. Photodiode [ออนไลน์]. สืบค้นจาก http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/photodiodesymboltypes.html

[5] Sze S.M. and Kwok K. Ng. Semiconductor Devices Physics and Technology. 3nd ed. United States of America: John Wiley&Sons. 2007.

[6] Kittel C. Introduction to Solid State Physics. 8th ed. United States of America: John Wiley&Sons. 2005.

[7] ดุสิต เครืองาม. “ โซลิดสเตทฟิสิกส์.” พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น 2535.

[8] Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Chracterization.NewYork: JohnWiley & Sons, Inc., Publication. 1990.

[9] เอกชัย วิลามาศ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อ วิวิธลพันธ์ CdS/CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] ไกรศักดิ์ ยืนยั่ง "การศึกษาขั้วสัมผัสโอห์มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์" วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง. 2553.

[11] photodiode, [Online]. Avilable: https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode

[12] Dino Masch. 2014. Heterojunction silicon based solar cells. [ออนไลน์].สืบค้นจาก : https://www.slideshare.net/dinomasch/heterojunction-silicon-based-solar-cells

[13] Electronics Tutorials. 2016. วงจร RC [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/series-circuit.html

[14] Sze S.M. and Kwok K. Ng. Semiconductor Devices Physics and Technology. 3nd ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2007.

[15] Andor an Oxford Instruments company.Pulsed Laser Deposition [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: http://www.andor.com/learning-academy/pulsed-laser-deposition-an-introduction-to-pulsed-laser-deposition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้